

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

UTILIZAÇÃO DE ALARGADORES DE GUME ÚNICO REGULÁVEL
PARA A OBTENÇÃO DE FUROS DE PRECISÃO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
MECÂNICA

MOACIR ECKHARDT

FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 1993

UTILIZAÇÃO DE ALARGADORES DE GUME ÚNICO REGULÁVEL
PARA A OBTENÇÃO DE FUROS DE PRECISÃO

MOACIR ECKHARDT

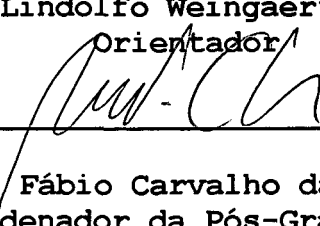
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr. Ing.
Orientador



Prof. Antônio Fábio Carvalho da Silva, Dr. Eng.
Coordenador da Pós-Graduação

BANCA EXAMINADORA



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr. Ing.
Presidente



Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng.



Eng. Rolf Bertrand Schroeter, M. Eng

À minha esposa **Marinês** e minha filha **Adriana**.

Aos meus pais **Arlindo** e **Olinda**.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, pela orientação deste trabalho.

À Universidade Regional Integrada (URI) e ao MEC (CAPES) PICD, pelo apoio financeiro que possibilitou a realização deste trabalho.

À firma August Beck GmbH, da Alemanha pelo fornecimento dos alargadores de gume único regulável e de bibliografia.

Às empresas:

- SKF Fábrica Paulista de Brocas e Ferramentas de Corte;
- TWILL Indústria e Comércio Twill S.A.,

pelas doações de ferramentas de corte.

Aos companheiros de pós-graduação e professores do Departamento de Engenharia Mecânica.

Aos técnicos e bolsistas do Laboratório de Máquinas-Ferramentas - USIMAQ, Laboratório de Mecânica de Precisão - LMP e Laboratório de Metrologia - LABMETRO, pelo auxílio prestado.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO DA ARTE	4
2.1. Alargamento	4
2.2. Alargadores de Gume Único Regulável com Inseto Intercambiável	5
2.2.1. Generalidades	5
2.2.2. Geometria de Corte	8
2.2.3. Construção e Regulagem das Ferramentas ..	12
2.3. Formas Construtivas dos Alargadores de Gume Único	15
2.3.1. Alargadores de Gume Único Cônicos	17
2.3.2. Alargadores de Gume Único com Construção Especial	18
2.4. Materiais de Corte Empregados nos Alargadores de Gume Único	20
2.4.1. Metal-Duro	20
2.4.2. Cermet	21
2.4.3. Diamante Policristalino	23
2.5. Parâmetros de Usinagem no Alargamento com Alargadores de Gume Único	26
2.5.1. Velocidade de Corte	26
2.5.2. Avanço	27

2.5.3. Sobremedida de Usinagem	28
2.6. Fluido de Corte	29
2.7. Qualidades Obtidas com Alargadores de Gume Único	31
2.8. Medição de Forças de Corte	32
2.9. Equações de Respaldo	34
2.9.1. Velocidade de Corte	34
2.9.2. Largura de Usinagem	34
2.9.3. Espessura de Usinagem	34
2.9.4. Rugosidade R_t	34
3. PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	36
3.1. Ferramentas Empregadas	36
3.2. Materiais Utilizados	38
3.3. Corpos de Prova	39
3.4. Máquina-Ferramenta	39
3.5. Alimentação Interna do Fluido de Corte	39
3.6. Equipamento para Medir as Forças de Usinagem	40
3.6.1. Dinamômetro Piezelétrico	42
3.6.2. Amplificador de Sinais	43
3.6.3. Unidade de Controle e Aquisição de Dados	43
3.6.4. Microcomputador	43
3.7. Regulagem e Verificação do Gume do Alargador	44
3.7.1. Metroscópio Horizontal	44
3.7.2. Microscópio de Ferramentaria	44
3.7.3. Grande Microscópio de Ferramentaria	45
3.8. Verificação da Qualidade dos Furos	45

3.8.1. Micrômetro Interno	45
3.8.2. Rugosímetro	45
3.8.3. Circularímetro	46
3.8.4. Máquina de Medir por Coordenadas	46
3.9. Calibração do Sistema de Medição das Forças de Usinagem	46
3.10. Determinação das Variáveis do Processo	47
3.10.1. Velocidade de Corte	47
3.10.2. Avanço	48
3.10.3. Sobremedida de Usinagem	48
3.10.4. Ângulo de Saída	49
3.10.5. Inclinação do Gume	49
3.10.6. Fluido de Corte	50
3.11. Metodologia Empregada	50
4. EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	52
4.1. Preparação dos Ensaios	52
4.1.1. Corpos de Prova	52
4.1.2. Controle dos Ensaios	53
4.1.3. Sequência de Usinagem	53
4.1.4. Medição das Forças de Usinagem	54
4.1.5. Procedimentos-Padrões	54
4.2. Realização dos Ensaios	55
4.3. Parâmetros de Usinagem e Variáveis do Processo ..	56
4.3.1. Velocidade de Corte	56
4.3.2. Avanço	57

4.3.3. Sobremedida de Usinagem	58
4.3.4. Inclinação do Gume	58
4.3.5. Ângulo de Saída	59
4.3.6. Fluido de Corte	60
4.4. Determinação da Qualidade Obtida nos Furos	60
4.4.1. Coleta dos Dados de Ensaaios	60
4.4.2. Rugosidade	61
4.4.3. Erros de Circularidade	61
4.4.4. Erros de Cilindricidade	61
4.4.5. Sobremedida dos Furos	62
4.5. Regulagem dos Alargadores de Gume Único	62
4.6. Modo de Retirada da Ferramenta do Furo	65
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
5.1. Influência das Variáveis de Entrada sobre a Rugosidade	67
5.1.1. Influência da Velocidade de Corte	67
5.1.2. Influência do Avanço	69
5.1.3. Influência da Sobremedida de Usinagem ...	71
5.1.4. Influência do Ângulo de Saída	73
5.1.5. Influência da Forma de Alimentação do Fluido de Corte	75
5.2. Influência das Variáveis de Entrada sobre a Circularidade e a Cilindricidade	77
5.3. Influência das Variáveis de Entrada sobre a Sobremedida dos Furos	77

5.3.1. Influência da Velocidade de Corte	77
5.3.2. Influência do Avanço	79
5.3.3. Influência da Sobremedida de Usinagem ...	80
5.3.4. Influência do Ângulo de Saída	81
5.3.5. Influência da Forma de Alimentação do Fluido de Corte	82
5.4. Influência das Variáveis de Entrada sobre a Tolerância Dimensional	83
5.5. Influência das Variáveis de Entrada sobre as Componentes da Força de Usinagem	84
5.5.1. Influência da Velocidade de Corte	85
5.5.2. Influência do Avanço	87
5.5.3. Influência da Sobremedida de Usinagem ...	89
5.5.4. Influência do Ângulo de Saída	91
5.5.5. Influência da Forma de Alimentação do Fluido de Corte	93
5.5.6. Influência do Diâmetro	95
5.5.7. Influência do Material da Peça	97
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO	99
6.1. Conclusões	99
6.2. Sugestões para Continuidade	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
BIBLIOGRAFIA AUXILIAR	109

ANEXO 1	111
ANEXO 2	114
ANEXO 3	118
ANEXO 4	125
ANEXO 5	127

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

2.1. Geometria dos gumes nos alargadores convencionais de gumes múltiplos.....	6
2.2. Ângulo de incidência nos alargadores de gume único regulável	7
2.3. Geometria de corte dos insertos intercambiáveis	9
2.4. Formas de chanfro de entrada	11
2.5. Construção dos alargadores de gume único	13
2.6. Dispositivo para regulagem dos alargadores	15
2.7. Alargador de gume único com piloto de guia	16
2.8. Construção dos alargadores de gume único cônicos	17
2.9. Alargador de gume único escalonado	18
2.10. Alargador escalonado com inserto perfilado	19
2.11. Alargador escalonado com inserto trigonal	19
2.12. Construção do inserto de PKD	24
2.13. Ferramenta com gume sem raio de arredondamento	35

CAPÍTULO 3

3.1. Geometria dos insertos intercambiáveis	37
3.2. Dimensões das ferramentas	38
3.3. Suporte pendular	40

3.4.	Esquema geral da medição da força de usinagem	41
3.5.	Dinamômetro piezelétrico a quatro componentes	42

CAPÍTULO 4

4.1.	Construção do alargador de 12,0 mm de diâmetro	63
4.2.	Condição do inserto com o aperto final a 0,01 mm da medida final	64
4.3.	Condição do inserto com o aperto final a 0,005 mm da medida final	64

CAPÍTULO 5

5.1.	Influência de v_c sobre R_a e R_t	68
5.2.	Influência de f sobre R_a e R_t	70
5.3.	Influência de "a" sobre R_a e R_t	72
5.4.	Influência de γ_0 sobre R_a e R_t	74
5.5.	Influência da forma de alimentação do fluido de corte sobre R_a e R_t	76
5.6.	Influência de v_c sobre a sobremedida dos furos	78
5.7.	Influência de f sobre a sobremedida dos furos	79
5.8.	Influência de "a" sobre a sobremedida dos furos	80
5.9.	Influência de γ_0 sobre a sobremedida dos furos	81

5.10. Influência da forma de alimentação do fluido de corte sobre a sobremedida dos furos	82
5.11. Estudo da tolerância dimensional	84
5.12. Influência de v_c sobre Md	86
5.13. Influência de v_c sobre Ff	87
5.14. Influência de f sobre Md	88
5.15. Influência de f sobre Ff	89
5.16. Influência de "a" sobre Md e Ff.....	91
5.17. Influência de γ_0 sobre Md e Ff.....	93
5.18. Influência da forma de alimentação do fluido de corte sobre Md e Ff	94
5.19. Influência do diâmetro sobre Md e Ff	96
5.20. Influência do material sobre Md e Ff	98

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

- 2.1. Avanços (f) recomendados para o alargamento de materiais ferrosos e não-ferrosos 28
- 2.2. Sobremedidas de usinagem (a) recomendadas para o alargamento de materiais ferrosos e não-ferrosos 29

CAPÍTULO 3

- 3.1. Velocidades de corte recomendadas para o alargamento das ligas de alumínio e bronze 47
- 3.2. Avanços recomendados para o alargamento das ligas de alumínio e bronze 48
- 3.3. Sobremedidas de usinagem recomendadas para o alargamento das ligas de alumínio e bronze 48
- 3.4. Ângulos de saída recomendados para o alargamento de ligas de alumínio e bronze 49

SIMBOLOGIA

a	mm	Sobremedida de Usinagem
b	mm	Largura de Usinagem
b'_α	mm	Largura da Guia
D	mm	Diâmetro da Ferramenta
f	mm/rot	Avanço por Rotação
Ff	N	Força de Avanço
h	mm	Espessura de Usinagem
HB		Dureza Brinell
L	mm	Comprimento do Chanfro de Entrada do Gume
Md	N.cm	Momento Torçor
n	rpm	Rotação
Ra	μm	Desvio Médio Aritmético (rugosidade Ra)
Rt	μm	Altura Máxima das Irregularidades (rugosidade Rt)
Rz	μm	Altura Média das Irregularidades em 5 Pontos (rugosidade Rz)
v_c	m/min	Velocidade de Corte
α_o	Grau	Ângulo de Incidência
γ_o	Grau	Ângulo de Saída
σ_t	N/mm	Resistência à Tração

Δ	Grau	Ângulo de Inclinação do Gume
χ_r	Grau	Ângulo de Direção do Gume da Ferramenta
χ_{r1}	Grau	Ângulo de Direção do 1° Gume Principal da Ferramenta
χ_{r2}	Grau	Ângulo de Direção do 2° Gume Principal da Ferramenta

RESUMO

Neste trabalho são estudadas as qualidades superficiais, de forma e dimensionais, bem como as forças de usinagem obtidas no alargamento com alargadores de gume único regulável, da liga de alumínio 2024-T351, também chamada de alumínio aeronáutico. Para isto, verifica-se a influência das variáveis de processo, como velocidade de corte, avanço, ângulo de saída, sobremedida de usinagem e forma de alimentação do fluido de corte. Também são realizados ensaios complementares de força de usinagem variando-se os diâmetros das ferramentas e os materiais usinados.

Das investigações realizadas resulta que, com a ferramenta empregada, é possível a obtenção de furos com elevada qualidade superficial e de forma, tolerâncias dimensionais abaixo da classe IT6 e valores de momentos e forças de avanço extremamente pequenos.

Os furos com melhor qualidade foram obtidos empregando-se ferramentas com alimentação interna do fluido de corte e com avanços menores. Com relação às forças de usinagem, obteve-se os menores valores com: alimentação interna do fluido de corte; avanços e diâmetros menores; e para materiais com resistência mecânica menor.

ABSTRACT

This work concerns with the study of the geometrical quality and cutting forces on reaming aluminum alloy 2024-T351 (also called aerospace aluminum) with a single blade reamer. The tests have investigated the influence of the process variables, such as cutting speed, feed rate, rake angle, depth of cutting and modes of cutting fluid supply. Also the cutting forces were measured for different materials and tools diameters.

The result of this investigation was that this tool allows producing excellent surface finish, bores better than ISO IT6 at extremely small moments and cutting forces.

These higher quality bores were obtained supplying the cutting fluid through the tool and at lower feed rates. Concerning the cutting forces, less values were obtained by using concomitantly internal supplying of cutting fluid, at lower feed rates and diameters and materials with less resistance.

C A P Í T U L O 1

INTRODUÇÃO

Devido às brocas helicoidais não fornecerem furos precisos, é comum na indústria o emprego de operações subsequentes para obter as necessárias características de qualidade, como melhor precisão dimensional, maior precisão de forma e melhora do acabamento superficial. Para realizar esta tarefa, é comum o emprego posterior à furação de alargadores de gumes múltiplos. Devido à geometria dos gumes destas ferramentas não favorecerem a usinagem, elas são limitadas em termos de acabamento superficial, precisão de forma e dimensional exigidas.

Recentemente, vem sendo empregados alargadores com insertos intercambiáveis - chamados de alargadores de gume único regulável - que oferecem várias vantagens comparados aos alargadores convencionais de gumes múltiplos. Devido à geometria de corte otimizada, o alargador de gume único, ao mesmo tempo em que melhora a qualidade dos furos, possibilita uma redução substancial nos tempos de fabricação, tanto pelas altas velocidades de corte e vidas longas alcançáveis com estas ferramentas, como pela eliminação de possíveis operações posteriores ao alargamento. No uso destas ferramentas em máquinas comandadas numericamente, devido

ao alto valor da hora-máquina, a diminuição dos tempos de fabricação tem importância significativa na redução do custo de fabricação.

A utilização crescente das máquinas comandadas numericamente (NC/CNC), tem exigido o emprego de ferramentas que permitam trabalhar com velocidades de corte e avanços maiores, compatíveis com as possibilidades das máquinas-ferramenta.

Para a obtenção de furos precisos são utilizados processos de usinagem com geometria definida, como alargamento e furação de precisão com ferramentas especiais, e também processos de usinagem com geometria não definida, como brunimento e retificação interna. Segundo Kress [1], para o uso em centros de usinagem CNC, os processos mais convenientes se restringem ao alargamento e à furação de precisão, pois os processos de brunimento e retificação interna necessitam de equipamentos especiais.

Este trabalho tem a finalidade de ampliar e aprofundar os conhecimentos sobre o alargamento de precisão, empregando ferramentas de gume único regulável com inserto intercambiável. Para isso, primeiramente são estudadas a variação da qualidade dos furos e a magnitude das forças de usinagem obtidos através da alteração das variáveis do processo, ou seja, da velocidade de corte, do avanço, da sobremedida de usinagem, do ângulo de saída e da forma de alimentação do fluido de corte, no alargamento da liga de alumínio 2024-T351.

Após a determinação dos valores das variáveis que obtêm os melhores resultados quanto a qualidade dos furos e forças de

usinagem, são realizados ensaios complementares nas ligas de alumínio 2011-T3, 6061-T6, 6262-T9 e 7075-T651, e também no bronze TM-23, para a averiguação do comportamento das forças de usinagem com a variação do material e do diâmetro da ferramenta.

A literatura [7] apresenta estudos semelhantes, empregando alargadores de gume único regulável, o que permite uma comparação de resultados obtidos.

C A P Í T U L O 2

ESTADO DA ARTE

2.1. Alargamento

O alargamento, segundo a norma DIN 8589 [2], é considerado um processo de usinagem de precisão, que tem como objetivos proporcionar um aumento de diâmetro, melhorando a qualidade superficial e a geometria de furos já existentes, obtendo tolerâncias de medida com qualidade IT7 e melhores [3,4,5].

No alargamento são empregadas ferramentas com geometria definida que, através de um movimento relativo entre peça e ferramenta, produzem uma remoção pequena e uniforme de material das paredes do furo. Devido a isto, os furos iniciais (de preparação) devem possuir circularidade, retilineidade e acabamento superficial regulares.

A precisão dos furos e a qualidade superficial produzidas no alargamento dependem fundamentalmente das condições iniciais dos furos, rigidez da máquina-ferramenta e das fixações da peça e da ferramenta, velocidade de corte e de avanço corretas, fluido de corte conveniente e aplicado de forma apropriada, material da

ferramenta de corte e geometria do gume adequados ao material da peça, e do estado geral da ferramenta [5].

Uma característica do alargamento é que o próprio alargador se guia no furo que está sendo executado, isto é, não necessita de nenhum tipo de dispositivo de auxílio para a usinagem [2,6].

Caso exista um deslocamento entre o eixo da ferramenta e o eixo do furo de preparação, é recomendável o emprego de suportes pendulares para garantir a correção do erro de paralelismo e angular [1,2,5].

Embora a operação de alargamento esteja sendo substituída em alguns casos de produção de grandes séries por operações de torneamento interno de precisão e furação de precisão, ainda é de muita importância para pequenas e médias séries [2,3,7].

2.2. Alargadores de Gume Único Regulável com Inserto Intercambiável

2.2.1. Generalidades

Os alargadores de gumes múltiplos tradicionais são confeccionados de tal maneira que os gumes realizam tanto o trabalho de guiar a ferramenta quanto a usinagem do material. Devido a esta forma característica de gume temos, no gume secundário, uma guia cilíndrica (Figura 2.1). Isto significa, visto

pelo lado da geometria do gume, nada mais do que um ângulo de incidência (α_o) = 0° [1,2,8,9].

Segundo Stemmer [10], a principal função do ângulo de incidência é evitar o atrito entre a peça e o flanco da ferramenta, e permitir que o gume penetre no material e corte livremente. Se o ângulo de incidência for de 0° , como nestes alargadores, o gume não penetra convenientemente no material e a ferramenta cega rapidamente, ocorrendo atrito contra a peça, demasiado aquecimento da ferramenta e mau acabamento da superfície usinada.

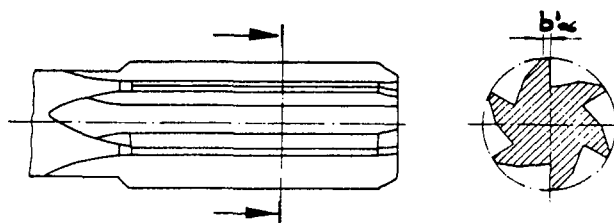


Figura 2.1 - Geometria dos gumes nos alargadores convencionais de gumes múltiplos [1]

Devido a esta parte da geometria relativamente desfavorável, estes alargadores permitem apenas baixas velocidades de corte, entre 10 e 20 m/min. Isto vale tanto para alargadores de aço-rápido quanto de metal-duro, revestidos ou não [2,8]. Além disso, há uma certa incerteza de alcançar uma qualidade IT7 nos furos alargados. Isto se deve, entre outras coisas, à tendência de produção de furos

não circulares, que é amenizada pela distribuição desigual dos gumes do alargador [1,6].

As desvantagens dos alargadores de gumes múltiplos conduziram a uma série de novos e amplos desenvolvimentos para a usinagem de furos de precisão. Com o desenvolvimento dos alargadores de gume único regulável com insertos intercambiáveis ocorreu, sem dúvida, um sensível avanço na técnica do alargamento [6]. Nestes alargadores, as tarefas de usinagem e guia da ferramenta no furo são divididas em dois elementos. O processo de corte é realizado por um inserto intercambiável, onde o gume é concebido para uma usinagem ótima e possui um ângulo de incidência (α_0) positivo (Figura 2.2).

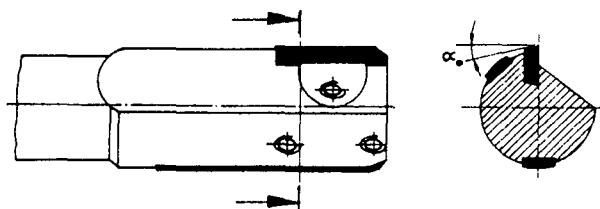


Figura 2.2 - Ângulo de incidência nos alargadores de gume único regulável [1]

Os elementos de guia - as réguas-guias - além de conduzirem rigidamente a ferramenta, possibilitando assim o alargamento de

furos longos e de pequenos diâmetros, absorvem as componentes da força de usinagem [1,2,8,11,12]. Através da possibilidade de um ajuste preciso do inserto intercambiável, é possível a obtenção de tolerâncias estreitas [6].

Os alargadores de gume único permitem velocidades de corte significativamente maiores em relação às dos alargadores convencionais. Assim como acontece com os alargadores convencionais, os alargadores de gume único não utilizam nenhum tipo de dispositivo para entrar no furo, como consequência estas ferramentas também não possibilitam a correção de erros de posição anteriores.

Através da concepção geométrica otimizada são cumpridas algumas exigências hoje solicitadas às ferramentas de usinagem, como características de corte superiores, melhores qualidades superficiais, alta precisão dimensional e de forma e tempos de vida maiores. Além disso, com a possibilidade de utilização de máquinas-ferramentas convencionais, os custos de investimento são relativamente pequenos [6,8].

2.2.2. Geometria de Corte

A geometria dos insertos dos alargadores de gume único regulável é semelhante às geometrias empregadas nas ferramentas de tornear, sendo os resultados obtidos também semelhantes [2,9].

Na Figura 2.3 estão indicados o ângulo de saída (γ_o), os ângulos de direção (χ_{r1}, χ_{r2}), o ângulo de incidência (α_o) e o comprimento do chanfro de entrada (L).

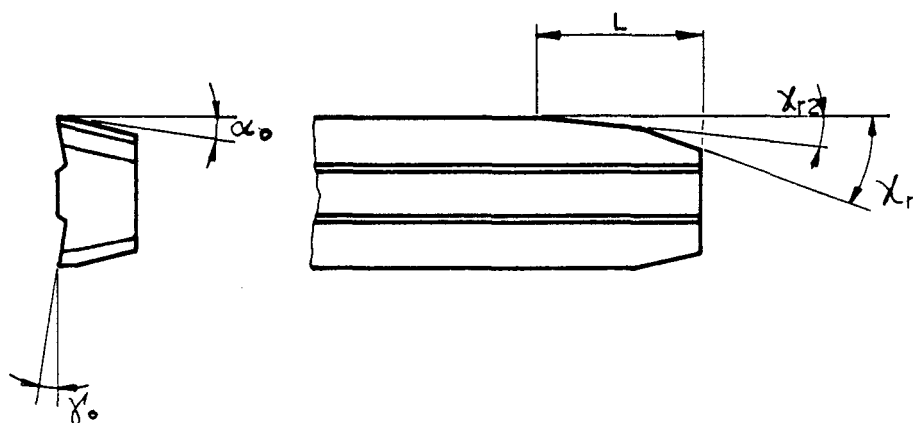


Figura 2.3 - Geometria de corte dos insertos intercambiáveis

Os ângulos de saída adequados devem ser escolhidos de acordo com o material a ser usinado. Para ferro fundido cinzento (GG), ferro fundido nodular (GGG) e latão duro, assim como aços com resistência à tração acima de 900 N/mm², utilizam-se ângulos de saída de 0° [13,14] ou 2° [15]. Para aços com resistência à tração até 900 N/mm² e ferro fundido nodular com cromo, ângulos de saída de 6° [13,14] ou 7° [15], e para aços com resistência à tração abaixo de 700 N/mm², assim como para ligas de alumínio, 12° [14] ou 15° [13,15].

Como pode ser visto na Figura 2.3, os insertos intercambiáveis possuem dois gumes principais. O gume principal

formado pelo ângulo de direção χ_{r1} é responsável pela remoção do excesso de material das paredes do furo e o segundo gume principal, formado pelo ângulo de direção χ_{r2} , efetua um corte de acabamento, melhorando a qualidade dimensional e superficial do furo [4,5].

Segundo Schallbroch [16], para ângulos de direção pequenos têm-se boas qualidades superficiais, principalmente por possibilitar a entrada da ferramenta no furo e o corte do material mais suavemente. Ângulos muito pequenos provocam engripamento da ferramenta no furo, enquanto ângulos grandes levam a uma piora da qualidade superficial.

Para a escolha correta dos ângulos de direção (chanfros) deve-se observar o comprimento do chanfro (L), a sobremedida de usinagem (a) e/ou a qualidade superficial (Rt) desejada [8,13].

Na Figura 2.4 são apresentados exemplos de algumas formas de chanfros empregadas, juntamente com suas características de utilização.

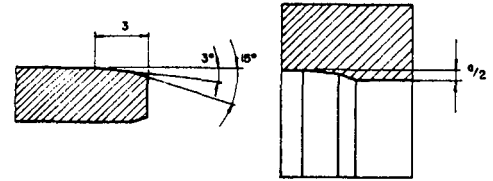
A forma (a) é considerada padrão e deve ser usada sempre que possível. Fornece as melhores qualidades superficiais. Pode ser utilizada em furos cegos se houver espaço suficiente no fundo do furo [8,13].

A forma (b) acarreta qualidades superficiais piores que a forma (a). É a mais indicada para furos cegos, pois possui comprimento de chanfro (L) menor [8,13].

As formas (c) e (d) são especiais para grandes sobremedidas de usinagem, sendo que a forma (d) é a mais indicada para peças de paredes finas, pois quase não ocasiona forças radiais [8,13].

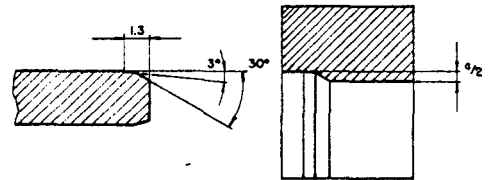
- a) - Sobremedida de Usinagem
 $0,1 \text{ mm} \leq a \leq 0,5 \text{ mm}$

- Qualidade Superficial
 $1 \text{ } \mu\text{m} \leq R_t \leq 4 \text{ } \mu\text{m}$



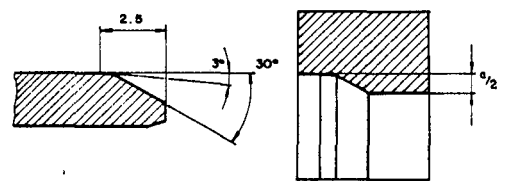
- b) - Sobremedida de Usinagem
 $0,1 \text{ mm} \leq a \leq 0,5 \text{ mm}$

- Qualidade Superficial
 $2 \text{ } \mu\text{m} \leq R_t \leq 6 \text{ } \mu\text{m}$



- c) - Sobremedida de Usinagem
 $0,8 \text{ mm} \leq a \leq 1,2 \text{ mm}$

- Qualidade Superficial
 $5 \text{ } \mu\text{m} \leq R_t \leq 15 \text{ } \mu\text{m}$



- d) - Sobremedida de Usinagem
 $0,8 \text{ mm} \leq a \leq 1,2 \text{ mm}$

- Qualidade Superficial
 $6 \text{ } \mu\text{m} \leq R_t \leq 12 \text{ } \mu\text{m}$

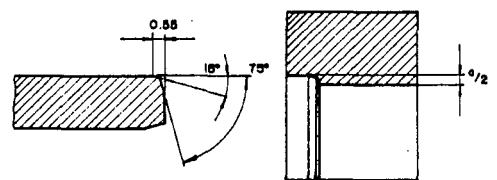


Figura 2.4 - Formas de chanfro de entrada [13]

Ângulos de incidência (α_0) positivos, entre 4° e 8° [9], possibilitam um corte ótimo, pois o gume penetra e corta o material livremente, não ocorrendo atrito entre a parede da peça e o flanco da ferramenta. O ângulo de incidência varia dependendo da resistência e dureza do material a ser usinado. Na usinagem de materiais moles como o alumínio, recomendam-se ferramentas com ângulos bem maiores do que aqueles para materiais duros, como ferro fundido coquilhado, pois estes solicitam muito mais o gume [10].

O gume dos alargadores de gume único, assim como o dos alargadores convencionais, apresenta uma inclinação em direção à haste da ferramenta, resultando em uma redução do diâmetro. Esta redução deve manter-se entre os valores de 0,008 a 0,010 mm para cada 10 mm de comprimento do gume [12,17]. Striegl [15] recomenda valores entre 0,010 e 0,020 mm medidos sobre o comprimento total do gume. Somente o gume é inclinado, sendo que as réguas-guias são cilíndricas. Sem esta inclinação do gume a ferramenta emperraria no furo [8,12,13].

2.2.3. Construção e Regulagem das Ferramentas

A construção dos alargadores de gume único é simples, porém de elevada precisão. Eles possuem poucos elementos mecânicos, o que possibilita ao corpo da ferramenta ter uma elevada rigidez (Figura 2.5).

Os insertos intercambiáveis são fixados com elementos comuns, como garras de fixação, encaixes, parafusos e outros [8,15].

Estas fixações permitem uma troca rápida do inserto após o término da vida. A precisão que estas ferramentas oferece é conseguida através de parafusos de ajuste, os quais colocam o inserto intercambiável na posição desejada.

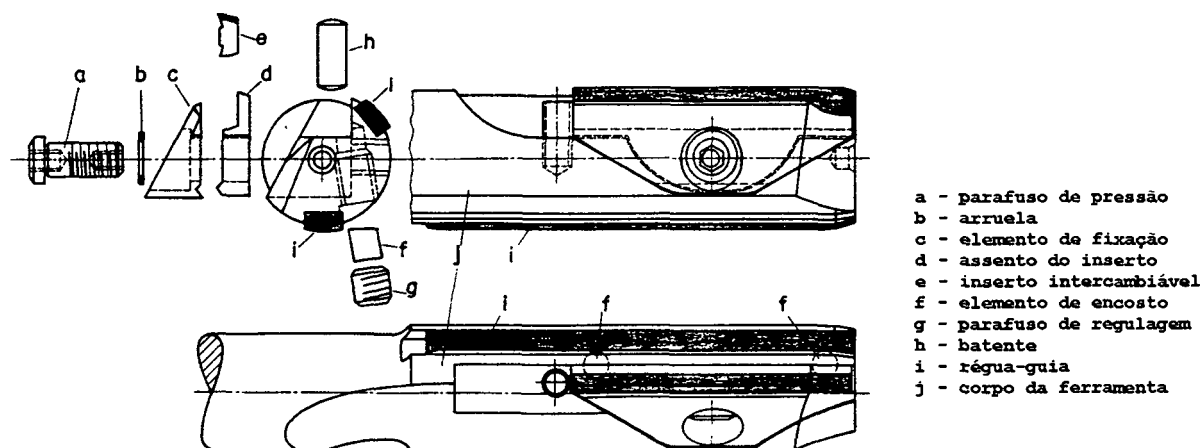


Figura 2.5 - Construção dos alargadores de gume único [13]

Apesar dos alargadores poderem ser regulados, eles não operam em uma grande gama de diâmetros. O campo de ajuste do diâmetro é de cerca de 0,04 mm. O motivo desta impossibilidade é devido às réguas-guias serem retificadas para um certo diâmetro nominal. Esta condição de regulagem do alargador, mesmo sendo limitada, compensa a diminuição do diâmetro pelo desgaste e impede a ultrapassagem do limite inferior de tolerância. Quando o gume, durante o ajuste, é deslocado excessivamente na direção radial sobre o corpo base, obtém-se como consequência furos não circulares, porque o apoio oferecido pelas réguas-guias deixa de ser um contato puntual sobre a circunferência gerada pelo gume, ocasionando um aumento do atrito entre as réguas-guias e a parede do furo, o que leva a grandes deformações do furo e com isto não se consegue garantir uma circularidade elevada.

Deve-se observar também que, uma vez escolhida a forma de corte do inserto, esta não deve ser mais alterada, pois as réguas-guias são retificadas de acordo com a geometria do inserto (ângulo de direção). A utilização de um inserto com forma diferente poderia levar a uma sobressaída axial ou radial das réguas-guias em relação ao gume, e assim estas entrariam em contato com a parede do furo antes do inserto [8].

Para a regulagem dos alargadores, existem dispositivos próprios que realizam este trabalho em pouco tempo (Figura 2.6). Nestes dispositivos, a ferramenta é sujeitada entre pontas, onde relógios comparadores com resolução de 1 μm , montados e posicionados de forma a apalpar o gume, permitem a regulagem do diâmetro e da inclinação do gume. A medida é tomada entre o gume e a régua-guia oposta.

Chistoffel [8], Striegl [15] e fabricantes [13,17] recomendam que a medida do ajuste seja:

$$\text{Medida do Ajuste} = \text{Menor Diâmetro} + 40 \% \text{ do Campo de Tolerância Total}$$

Nominal

Assim, por exemplo, a medida de ajuste da ferramenta para usinar um furo de 20 H7 mm de diâmetro é calculada da seguinte forma:

$$20,000 + 0,4 \times 0,021 = 20,008 \text{ mm.}$$

A medida do diâmetro do alargador deve ser ajustada com uma variação máxima da medida calculada de $\pm 2 \mu\text{m}$.

Não só a ajustagem da medida de corte em si, mas também a manutenção da inclinação do gume devem ser precisas, já que pequenos desvios levam a vibrações, desgaste demasiado, falta de circularidade ou emperramento da ferramenta [15].

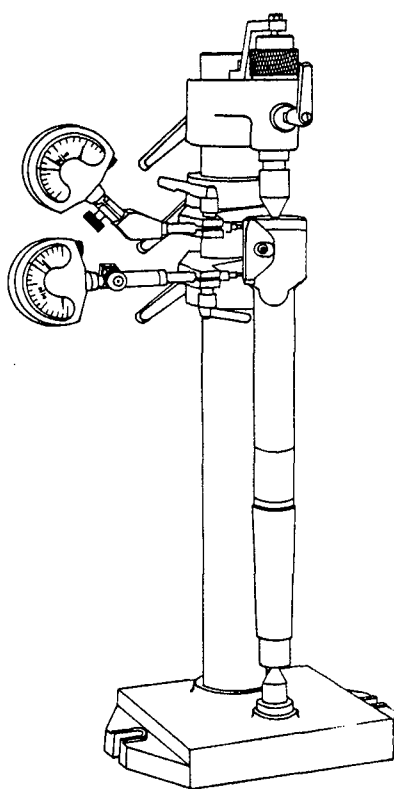


Figura 2.6 - Dispositivo para regulação dos alargadores [13]

2.3. Formas Construtivas dos Alargadores de Gume Único [8]

Os alargadores de gume único são encontrados com diâmetros variando de 8,0 a 60,0 mm, podem apresentar haste cilíndrica (DIN

212) ou cônica (DIN 208), alimentação do fluido de corte externa ou interna através de canais, e podem ser utilizados para o alargamento de furos cilíndricos, cônicos ou escalonados.

Os furos sem interrupção na parede (rasgos para chaveta, furos, fendas) são alargados por alargadores de gume único que possuem normalmente duas réguas-guias. Em furos com interrupções axiais longas, os alargadores de gume único possuem uma régua-guia adicional. Esta régua-guia adicional é necessária para que durante a rotação da ferramenta, na posição de rebaixo, a ferramenta seja bem guiada, evitando que ocorra o engate das réguas-guias ou do gume nas interrupções.

Para o alargamento de furos consecutivos alinhados, com pequenos espaços entre si, são utilizados alargadores com piloto de guia (Figura 2.7).



Figura 2.7 - Alargador de gume único com piloto de guia [13]

2.3.1. Alargadores de Gume Único Cônicos

Os alargadores de gume único cônicos apresentam, em relação aos alargadores de gume único cilíndricos, algumas particularidades (Figura 2.8).

Com relação ao modo de fixação do inserto, este é fixado por dois parafusos, pois na usinagem cônica todo o comprimento do gume entra em contato com a parede do furo simultaneamente. Devido a isto, as forças de usinagem são significativamente maiores, exigindo uma fixação mais eficiente.

Quanto à geometria do inserto, este não apresenta chanfros de entrada. Na usinagem de furos passantes, a ponta do alargador sai do furo antes da parte frontal do inserto tocar as paredes do furo e realizar o corte; e em furos cegos, o pré-furo a ser alargado é maior que o diâmetro da ponta do alargador.

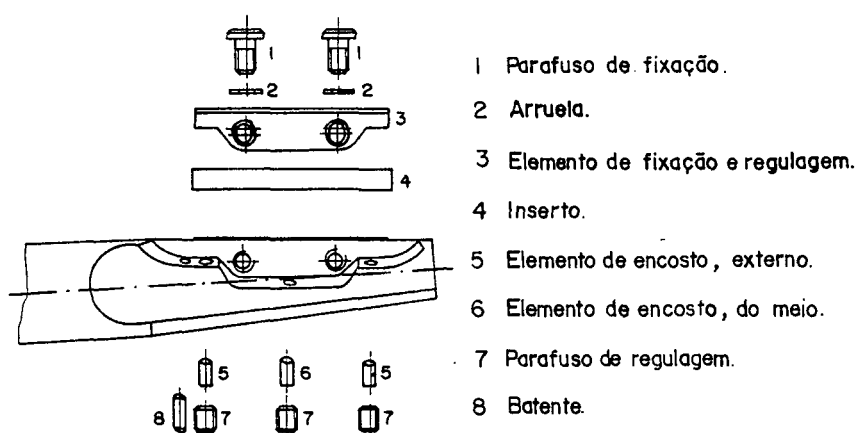


Figura 2.8 - Construção dos alargadores de gume único cônicos

Para a regulagem, os alargadores cônicos possuem três parafusos de ajuste. Os dois parafusos de ajuste externos agem sobre a garra de fixação do inserto e possibilitam a regulagem radial do gume. O terceiro parafuso age diretamente sobre o inserto fazendo com que ele fique ligeiramente abaulado. Esta medida não só melhora a vida da ferramenta, como também a sua resistência.

Para a regulagem dos alargadores de gume único cônicos são necessários três pontos de medição, pois tem-se a necessidade de determinar também a posição radial no meio do gume.

2.3.2. Alargadores de Gume Único com Construção Especial

Para o alargamento de furos escalonados, no lugar de serem utilizados vários alargadores, um para cada diâmetro de furo, empregam-se alargadores de gume único construídos de forma escalonada (Figura 2.9).

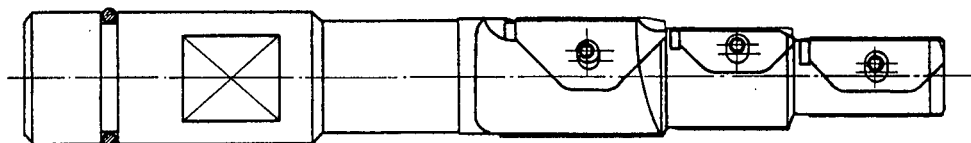


Figura 2.9 - alargador de gume único escalonado

Estes alargadores são construídos para uma aplicação específica, não podendo mais ser alterados os diâmetros estabelecidos e a geometria dos gumes.

Os alargadores de gume único podem realizar operações de chanframento, perfilamento e também mandrilamento de furos para posterior alargamento. As Figuras 2.10 e 2.11 a seguir mostram alguns exemplos de construção de alargadores de gume único que possuem insertos perfilados e insertos trigonais.

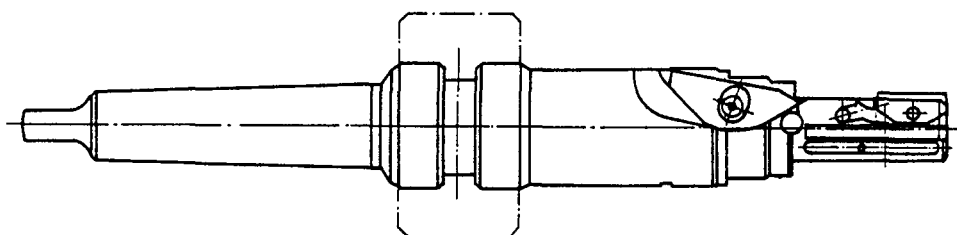


Figura 2.10 - Alargador escalonado com inserto perfilado [8]

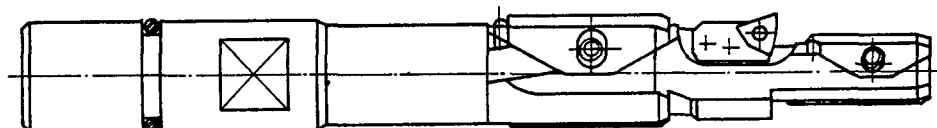


Figura 2.11 - Alargador escalonado com inserto trigonal [8]

2.4. Materiais de Corte Empregados nos Alargadores de Gume Único

Devido às pequenas sobremedidas de usinagem utilizadas no alargamento, os gumes necessitam ser afiados. Não sendo assim, as seções muito pequenas de usinagem não são usinadas adequadamente. Isto origina um processo de amassamento de material e atrito do gume com a parede do furo, o que influencia negativamente a qualidade dimensional e superficial dos furos. Ferramentas afiadas necessitam de materiais de corte com alta estabilidade de gume, já que as forças mecânicas e as solicitações térmicas se concentram em uma pequena área da cunha cortante [18].

Devido a estas exigências, como materiais de corte nos alargadores de gume único são empregados o metal-duro, o Cermet e o diamante policristalino (PKD).

2.4.1. Metal-Duro

Nas velocidades de corte usuais dos alargadores de gume único, o metal-duro não é exigido quanto à sua resistência a quente, o que também permite o emprego de insertos de aço-rápido. Devido às características de maior resistência à abrasão dos insertos de metal-duro, entretanto, estes apresentam uma viabilidade econômica mais favorável que os de aço-rápido [12].

Os insertos intercambiáveis e as réguas-guias são produzidas de metal-duro K10 [13,19,20] ou K05 [15]. Este último é usado quando se deseja obter maior tempo de vida útil, devido à maior resistência ao desgaste abrasivo do mesmo.

A utilização dos metais-duros do grupo K pelos fabricantes se deve a estes combinarem boa resistência ao desgaste com uma tenacidade mais elevada que os metais-duros dos grupos P e M. Também podem ser empregados insertos intercambiáveis revestidos com carboneto de titânio (TiC) e nitreto de titânio (TiN) [13,19]. Estas camadas de revestimento são usualmente aplicadas em metal-duro pelo processo CVD (Chemical Vapor Deposition) [21,22,23] e conferem à superfície dos insertos características como alta dureza, baixo coeficiente de atrito, boa estabilidade química e resistência a altas temperaturas [10,24].

2.4.2. Cermet

O neologismo Cermet - uma combinação do conceito de Cerâmica e Metal - dá a impressão de que um Cermet é suficientemente caracterizado pela combinação dos componentes metálicos e cerâmicos. Esta definição, porém, corresponde também aos metais-duros [18,25].

Os Cermets compõem-se de materiais cerâmicos (responsáveis pela dureza) e de um ligante metálico (responsável pela tenacidade

e consistência do material). Pela sua estrutura, os Cermets pertencem à classe dos metais-duros [18,24,26,27].

Nos metais-duros tradicionais o carboneto de tungstênio (WC) é o principal responsável pela dureza, juntamente com o carboneto de titânio (TiC) e o carboneto de tântalo (TaC). O ligante é o cobalto (Co) [26,27]. Segundo a literatura anglo-saxônica, os Cermets são metais-duros que possuem como material-base carbonitreto de titânio (TiCN), responsável pela dureza, e como ligante o níquel (Ni) e o molibdênio (Mo) [18,21,24,25,26,27,28].

A matéria-prima utilizada na fabricação dos Cermets é abundante e relativamente barata se comparada com os materiais empregados nos metais-duros tradicionais que são considerados caros e em menor abundância [24,25,26,27]. Como a densidade do tungstênio é elevada e a do titânio baixa, os Cermets são aproximadamente 60 % mais leves que os metais-duros [26].

Os Cermets possuem elevada dureza, uma diminuta tendência à difusão, uma pequena tendência à formação de gume postiço, assim como uma elevada resistência ao desgaste a quente [24,26,28]. As propriedades físicas e mecânicas dos Cermets estão situadas entre o metal-duro tradicional e as cerâmicas de corte [18,27]. Atualmente cobrem também, em alguns casos, os campos de aplicação das ferramentas de corte revestidas [24,25,28].

As propriedades que tornam este material interessante, principalmente para a usinagem de precisão e de acabamento [24,25,26], são a estabilidade de gume significativamente maior que o metal-duro e uma maior resistência à flexão em comparação com as

cerâmicas. Na usinagem de precisão, principalmente no alargamento, é necessária a presença de gumes afiados, impedindo deste modo o emprego da cerâmica. O Cermet possui a tenacidade do metal-duro e a resistência a quente e ao desgaste das cerâmicas [18].

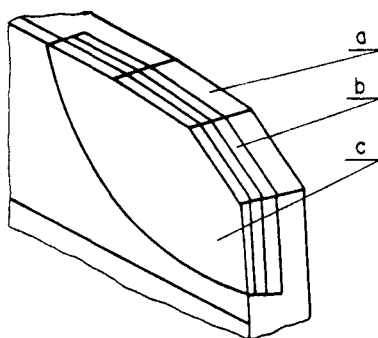
As réguas-guias dos alargadores de gume único podem ser tanto de metal-duro quanto de Cermet. Em consequência dos excelentes resultados obtidos quanto ao erro de forma e acabamento superficial, as réguas-guias dos alargadores de gume único regulável vem sendo fabricados cada vez com maior frequência de Cermets [18].

2.4.3. Diamante Policristalino

Apesar do diamante possuir a maior dureza de todos materiais conhecidos, durante séculos foi pouco utilizado como ferramenta. A intensiva utilização do diamante como material de corte na indústria se deu recentemente. Com o domínio da síntese do diamante nos anos 50, teve início um contínuo progresso, com o desenvolvimento de produtos específicos diamantados que tiveram acentuada utilização [9,29].

Ferramentas de diamante policristalino (PKD) foram apresentadas pela primeira vez em 1973. As ferramentas de diamante policristalino podem substituir parcialmente as ferramentas de diamante monocristalino e ferramentas de metal-duro. Para a fabricação de ferramentas de diamante policristalino empregam-se

partículas de diamante sintético extremamente finas, que são compactadas a uma densidade muito grande e posteriormente sinterizadas. A confecção do diamante policristalino é obtida em um reator de alta pressão e alta temperatura onde, nessas condições, as partículas de diamante sintético são ligadas a uma base de cobalto, obtendo-se um corpo policristalino compacto [9,10,24]. A espessura da camada de diamante, com aproximadamente 0,5 mm, pode ser sinterizada diretamente sobre um substrato de metal-duro (Figura 2.12) [9,24,30], ou soldada sobre um metal-duro com um metal de baixo módulo de elasticidade, evitando-se deste modo tensões no diamante decorrentes de deformações térmicas diferenciadas entre o diamante e o metal-duro [9,24].



a) metal-duro de base b) metal-duro de suporte c) PKD

Figura 2.12 - Construção do inserto de PKD [9]

Atualmente são produzidos diamantes policristalinos com granulação de cristais entre 2 e 25 μm [31]. Quanto menor a granulação dos cristais, tanto melhor a qualidade apresentada pelos gumes do inserto policristalino [29,31].

Em decorrência da orientação irregular dos cristais do diamante policristalino, este não apresenta uma direção preferencial de dureza, possuindo deste modo, ao contrário do diamante monocristalino, um caráter isotrópico [10,24,30].

A usinagem de aço e materiais ferrosos não é aconselhável com ferramentas de diamante, em decorrência da afinidade do ferro com o carbono. A diversidade de materiais que podem ser usinados com ferramentas de diamante policristalino abrange, além dos metais leves, metais amarelos, metais pesados e metais nobres, uma série de materiais plásticos, carvão, grafite e metal-duro pré-sinterizado [9,10,24,32].

O diamante policristalino encontra uma grande importância na usinagem de alumínio com alto teor de silício (hipereutéticos com teor de Si acima de 12 %) [9,10,24,29,30,31]. Isto se deve à sua vida útil ser muitas vezes superior à do metal-duro, utilizado anteriormente para estes trabalhos [30].

A aplicação das ferramentas de diamante policristalino não está restrita à usinagem de precisão, englobando também a usinagem de desbaste [24].

Nos alargadores de gume único com insertos de diamante policristalino, as réguas-guias são de metal-duro.

2.5. Parâmetros de Usinagem no Alargamento com Alargadores de Gume Único

Para se obter tolerâncias estreitas e boa qualidade superficial em um processo de alargamento eficiente e economicamente viável, devem ser observadas condições e parâmetros apropriados de usinagem [5].

2.5.1. Velocidade de Corte

Em alargadores convencionais, velocidades de corte muito pequenas afetam a produtividade sem que haja um substancial aumento na vida da ferramenta ou podem provocar adesão de material da peça no gume [5].

Nos alargadores de gume único regulável com inserto de metal-duro, onde o fluido de corte é alimentado de forma externa, as velocidades de corte para o alargamento de ferro fundido cinzento (GG) ou nodular (GGG) variam entre 6 e 30 m/min, e no aço, entre 8 e 20 m/min. As ligas de alumínio e de cobre podem ser usinadas com velocidades de corte variando entre 8 e 30 m/min [13,17,19]. Para insertos de Cermets e de diamante policristalino, estas velocidades são ainda maiores.

Empregando-se alimentação interna de fluido de corte em alargadores de gume único com insertos de metal-duro, as velocidades de corte podem ser duplicadas ou até mesmo triplicadas

[13,15,17,19]. Já para alargadores de gume único onde o inserto é de Cermet ou de diamante policristalino (PKD), estes valores são bem maiores. Este aumento na velocidade de corte é consequência da melhora na lubrificação, tanto das réguas-guias quanto da região de corte.

2.5.2. Avanço

A escolha do avanço depende principalmente do tipo de alargador usado, da sobremedida de usinagem e do acabamento superficial desejado [4,5,16]. Quanto maior a sobremedida de usinagem, menor deve ser o avanço [5].

Para grandes avanços, a qualidade superficial geralmente diminui, pois estes tendem a produzir marcas ou ondulações na parede do furo. Com avanços muito pequenos podem aparecer marcas de vibração, o que também influencia negativamente a qualidade superficial [4,16]. Com avanços muito pequenos, assim como para uma sobremedida de usinagem demasiadamente pequena, o gume não corta convenientemente, ocorrendo um desgaste excessivo do mesmo. Os avanços devem ser grandes o suficiente para permitir que o alargador corte o material sem que ele apenas atrite ou amasse a superfície do furo [5]. A literatura recomenda avanços entre 0,1 e 0,5 mm/rot [13,17,21].

MATERIAL	HB	σ N/mm ²	AVANÇO f mm/rot
GG	<200		0,1 a 0,5
GG	>200		0,2 a
GGG	<200	420	0,5
Aço			0,1 a 0,5
Aço Cr,Ni		<800	0,2 a 0,5

MATERIAL	HB	σ N/mm ²	AVANÇO f mm/rot
Duralumínio			0,1 a
Cobre Mole			0,3
Cobre Duro			0,1 a 0,5
Bronze Mole			0,1 a
Bronze Duro			0,3
Ligas Alum.			0,1 a 0,5

TABELA 2.1 - Avanços (f) recomendados para o alargamento de materiais ferrosos e não-ferrosos.

No emprego de alargadores com alimentação interna de fluido de corte, devido às maiores velocidades de corte possíveis, os avanços devem ser mais moderados.

2.5.3. Sobremedida de Usinagem

A qualidade superficial e a tolerância dimensional dos furos alargados dependem, também, da diferença entre o diâmetro do furo de preparação e o diâmetro do furo após o alargamento [4].

Para uma operação eficiente, a sobremedida de usinagem deve ser suficiente para permitir que o alargador corte durante todo o comprimento do furo. Variações na quantidade de material a ser removido podem influenciar na qualidade superficial e na tolerância final do furo alargado [5].

Sobremedidas de usinagem muito pequenas resultam em desgaste excessivo da ferramenta e no aumento da rugosidade, pois o gume não corta o material, apenas o deforma. Sobremedidas muito grandes, além de sobrecarregar o gume, podendo resultar em quebra do mesmo, ocasionam um aumento do diâmetro do furo e piora da qualidade superficial [5,16]. As sobremedidas de usinagem recomendadas estão mostradas na Tabela 2.2 [13,17,19].

MATERIAL	HB	σ N/mm ²	SOBREM. a (mm)
GG	<200		0,3
GG	>200		a
GGG	<200	420	0,5
Aço			0,1 a 0,5
Aço Cr,Ni		<800	0,2 a 0,3

MATERIAL	HB	σ N/mm ²	SOBREM. a (mm)
Duraluminio			0,1 a 0,5
Cobre Mole			0,2 a 0,5
Cobre Duro			0,3 a 0,5
Bronze Mole			0,2 a 0,5
Bronze Duro			0,1 a 0,5
Ligas Alum.			0,2 a 0,5

TABELA 2.2 - Sobremedidas de usinagem (a) recomendadas para o alargamento de materiais ferrosos e não-ferrosos.

2.6. Fluido de Corte

Em operações de alargamento, o acabamento superficial produzido é enfatizado como critério para a seleção do fluido de corte. Por isso, normalmente, o mesmo é escolhido com o objetivo maior de lubrificar do que de refrigerar o sistema [5,33]. Os fluidos de corte também têm como objetivos aumentar a vida da ferramenta, a eficiência da remoção de material e reduzir as

componentes da força de usinagem e conseqüentemente a potência de usinagem [10].

Os fluidos de corte, durante o processo de usinagem, atuam principalmente através de [10,24,30,34,35,36]:

- a) Refrigeração da peça e da ferramenta;
- b) Lubrificação, redução do atrito entre a ferramenta e a peça e entre a ferramenta e o cavaco;
- c) Prevenção de adesão, para prevenir ou eliminar a formação do gume postiço e com isso reduzir o lascamento do gume;
- d) Proteção contra corrosão;
- e) Retirada dos cavacos formados da região de corte.

A utilização do fluido de corte durante o alargamento com alargadores de gume único é indispensável pois, sem lubrificação, ocorre um rápido desgaste das réguas-guias [8].

O fluido de corte deve ser adequado ao material a ser usinado. Por exemplo, no alargamento de aço é recomendada a utilização de emulsão de óleo em água, em concentração de 10 % ou maior. Na usinagem de ferro fundido é recomendado o uso de emulsões sintéticas, e para a usinagem de alumínio, cobre e suas ligas, óleos de corte e emulsões de óleo em água [13,17].

2.7. Qualidades Obtidas com Alargadores de Gume Único

Striegl [15], utilizando alargadores com apenas um chanfro ($\chi_r = 60^\circ$) com um comprimento de 0,5 mm, obteve rugosidade R_t entre 4 e 12 μm usinando ferro fundido cinzento (GG) e nodular (GGG). Para alargadores com duplo chanfro ($\chi_{r1} = 60^\circ$, $\chi_{r2} = 3^\circ$) e com um comprimento de 1,0 mm, usinando os mesmos materiais, obteve valores de R_t variando entre 1 e 4 μm . Para ambos os casos, a circularidade e a cilindricidade dos furos obtidos permaneceu entre 1 e 3 μm .

Alargadores com inserto e réguas-guias de Cermet, usinando aço de corte livre 45 S 20 K com avanço $f = 0,2$ mm/rot e velocidade de corte $v_c = 280$ m/min, permitiram obter rugosidade $R_z = 1,6$ μm . No alargamento de ferro fundido GG-25 com avanço $f = 0,2$ mm/rot e velocidade de corte $v_c = 226$ m/min, a rugosidade R_z ficou entre 1,7 e 2,6 μm [18].

No alargamento de furos com diâmetros variando de 8,0 a 16,0 mm, em alumínio com alto teor de silício, empregaram-se alargadores escalonados com insertos de diamante policristalino (PKD). Para um avanço $f = 0,15$ mm/rot, uma velocidade de corte $v_c = 170$ a 280 m/min ($n = 5600$ rpm) e óleo emulsionável a 12 % como fluido de corte, obteve-se rugosidade R_t entre 1 e 2 μm , rugosidade $R_a = 0,2$ μm , erro de cilindricidade entre 1 e 2 μm e erro de circularidade de 1,5 μm [9].

Um outro emprego interessante de alargadores com insertos de diamante policristalino é a usinagem de blocos de motores de

alumínio com 17 % de silício. Furos com 24,0 mm de diâmetro foram alargados com velocidade de corte $v_c = 228$ m/min e avanço $f = 0,075$ mm/rot. A rugosidade dos furos ficou entre $R_t = 2$ a $3 \mu\text{m}$ e a vida da ferramenta ultrapassou os 20.000 furos [9].

No alargamento de furos cônicos em alavancas de direção de 50 Cr V 4, com resistência à tração de 1000 N/mm^2 , obteve-se rugosidade $R_z = 6 \mu\text{m}$ e erro de circularidade entre 2 e $3 \mu\text{m}$ [8].

Schroeter [7], usinando alumínio aeronáutico com avanços $f = 0,1$ a $0,5$ mm/rot, velocidade de corte $v_c = 19$ a 37 m/min e empregando óleo de corte como fluido de corte, obteve furos com rugosidade R_t entre $0,4$ e $1,7 \mu\text{m}$, rugosidade R_a entre $0,04$ e $0,17 \mu\text{m}$ e erro de circularidade entre 1 e $4 \mu\text{m}$.

2.8. Medição de Forças de Corte

As componentes da força de usinagem são determinadas através da utilização de equipamentos de medição que satisfaçam as seguintes exigências:

- boa sensibilidade, que garanta a medição das forças com precisão;
- alta rigidez, para garantir que o sistema de medição não influencie no processo de usinagem;
- alta frequência natural, para que também possam ser detectadas as componentes dinâmicas das forças de usinagem [24].

Os equipamentos de medição usuais utilizados para a determinação das forças de usinagem não a medem diretamente. Quando uma força atua sobre um material, este se deforma. Esta deformação pode ser então medida por um sistema passivo (indutivo, capacitivo ou através da medição de resistência em um calibre de tensão por fio). O princípio piezelétrico de medição de força se diferencia essencialmente destes por ser um sistema ativo [2].

Atualmente, os sistemas de medição mais utilizados para a medição de forças de usinagem são aqueles que utilizam transdutores de força com elementos sensíveis feitos de cristal de quartzo, com aproveitamento do efeito piezelétrico, pois estes possibilitam medir precisamente as componentes da força e o momento torçor.

O efeito piezelétrico é a propriedade existente em certos cristais de se tornarem eletricamente carregados quando submetidos a esforços mecânicos e, inversamente, de se deformarem elasticamente quando submetidos a uma polarização elétrica [37]. Quando uma força atua sobre um elemento de quartzo, ocorre na superfície deste uma carga elétrica proporcional à força. Portanto não há necessidade de medir a deformação em si [3].

As vantagens deste sistema de medição são a separação fácil das componentes, a rigidez elevada, que está na ordem de grandeza de 1000 a 5000 N/ μm , e uma frequência natural elevada, de 2,5 a 4 kHz. Outras características e propriedades são os pequenos valores de solicitação necessários para obter-se uma resposta (aproximadamente 0,01 N), grande faixa de utilização (acima de

$1:10^6$), alta linearidade, baixa histerese e facilidade de manuseio [24,37].

2.9. Equações de Respaldo

2.9.1. Velocidade de Corte

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (1)$$

2.9.2. Largura de Usinagem

$$b = \frac{a}{2 \cdot \sin \chi_r} \quad (2)$$

2.9.3. Espessura de Usinagem

$$h = f \cdot \sin \chi_r \quad (3)$$

2.9.4. Rugosidade Rt

Baseando-se nas equações apresentadas por Micheletti [36] e Nishiguchi [38] para o cálculo da rugosidade Rt em ferramentas com gume sem raio de arredondamento, da Figura 2.13 temos:

C A P Í T U L O 3

PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

3.1. Ferramentas Empregadas

Para a realização dos ensaios, são utilizados alargadores de gume único reguláveis com insertos intercambiáveis com as seguintes características:

- a) Fabricante: August Beck GmbH & Co (Alemanha).
- b) Modelo: RB 01, ARB 30.
- c) Versão: Automática - furos passantes (DL).
- d) Diâmetros: 12,0 mm;
15,0 mm;
24,0 mm.
- e) Tipo de haste: Haste cilíndrica, segundo DIN 212.
- f) Aplicação do fluido de corte: Externa ou interna.
- g) Geometria e material de corte dos insertos intercambiáveis:

Os insertos intercambiáveis utilizados na realização dos ensaios possuem diferentes ângulos de saída e material de corte.

Para todos os diâmetros de ferramentas, os inserts de metal-duro são da classe K10 e possuem ângulos de saída γ_o de 0° , 6° e 15° .

Para o alargador com diâmetro de 12,0 mm, são empregados também inserts de diamante policristalino (PKD) com ângulos de saída de 0° .

Todos os inserts possuem os mesmos ângulos de direção, ângulo de incidência e comprimento de chanfro (Figura 3.1):

$$\chi_{r1} = 30^\circ$$

$$\chi_{r2} = 3^\circ$$

$$\alpha_o = 7^\circ$$

$$L = 1,3 \text{ mm}$$

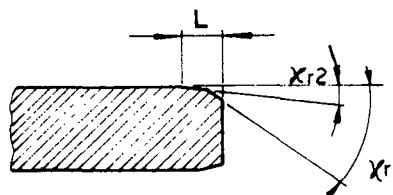


Figura 3.1 - Geometria dos inserts intercambiáveis

h) Dimensões das ferramentas (Figura 3.2):

d1 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	d2 h6 (mm)
12,0	120	75	16
15,0	130	75	20
24,0	150	90	20

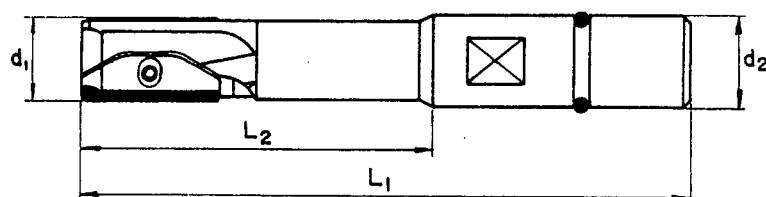


Figura 3.2 - Dimensões das ferramentas [13]

3.2. Materiais Utilizados

São empregadas na realização da pesquisa as ligas de alumínio 2011-T3, 2024-T351, 6061-T6, 6262-T9, 7075-T651 e também o bronze TM-23.

A composição química e as características mecânicas dos materiais se encontram no Anexo 1.

3.3. Corpos de Prova

Devido aos materiais utilizados nos ensaios serem de diversos fornecedores e as ferramentas possuírem diâmetros variados, temos corpos de prova com dimensões e formas diferentes, sendo os dispositivos de fixação adequados aos mesmos.

A distribuição dos furos varia segundo o diâmetro da ferramenta e também para evitar a influência de possíveis deformações na usinagem de um furo sobre um outro, realizado no mesmo corpo de prova. Estabeleceu-se uma distância mínima de $0,5.D$ entre as paredes de furos [39], como pode ser observado nas figuras do Anexo 2.

3.4. Máquina-Ferramenta [40]

Em todos os ensaios é utilizado um centro de usinagem Hueller Hille nb-h 65 comandado numericamente. Os dados técnicos constam do Anexo 3.

3.5. Alimentação Interna do Fluido de Corte

A máquina-ferramenta utilizada para realizar os ensaios não está devidamente preparada para a utilização de ferramentas com alimentação interna do fluido de corte. Para suprir esta

deficiência fez-se uma adaptação empregando-se um suporte pendular (Figura 3.3) que, além de melhorar a coaxilidade entre a ferramenta e o furo corrigindo erros angulares e de paralelismo, também permite acoplar a alimentação interna de fluido de corte na ferramenta.

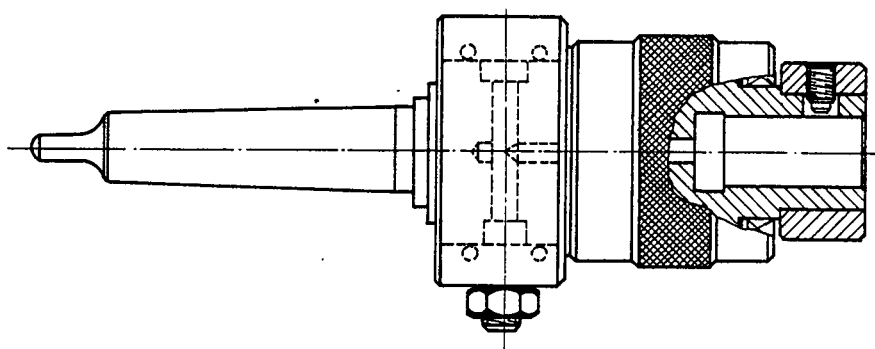


Figura 3.3 - Suporte pendular [13]

3.6. Equipamento para Medir as Forças de Usinagem

O sistema de medição utilizado para medir as forças de usinagem no processo de alargamento compreende os seguintes equipamentos:

- Dinamômetro piezelétrico;
- Amplificador de sinais;
- Unidade de controle e aquisição de dados;
- Microcomputador.

Através do efeito piezelétrico apresentado pelos cristais de quartzo (vide 2.8), o dinamômetro piezelétrico permite medir a força de avanço (F_f) e o momento torçor (M_d). Ligado ao dinamômetro piezelétrico temos os amplificadores de carga, que amplificam e transformam os sinais de carga gerados em um sinal de tensão. O sinal de tensão analógico é transformado em sinal digital na unidade de controle e aquisição de dados, possibilitando desta maneira tratar e armazenar os dados eletronicamente (Figura 3.4).

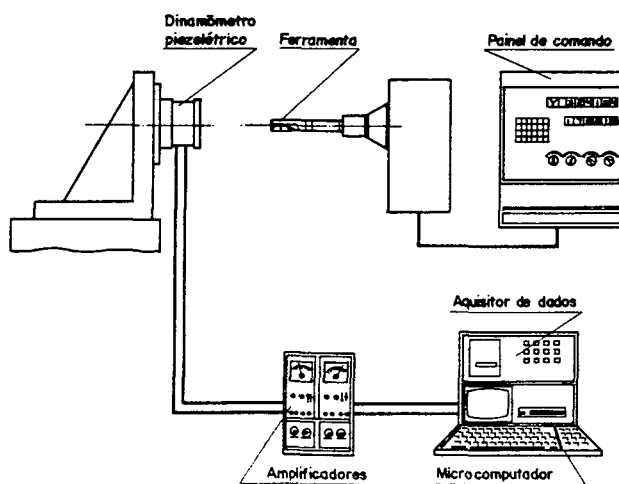


Figura 3.4 - Esquema geral da medição da força de usinagem

Os dados técnicos dos equipamentos para medir as forças de usinagem estão no Anexo 3.

3.6.1. Dinamômetro Piezelétrico [41]

O dinamômetro piezelétrico da Kistler Instrumente A.G., modelo 9273 a quatro (4) componentes (Figura 3.5), pode ser utilizado para a medição da força de avanço (F_f), do momento torçor (M_d) e das forças radiais (F_x e F_y) na furação, fresamento, etc. O dinamômetro é compacto e se caracteriza por uma grande rigidez e elevada frequência natural, propiciando a medição dinâmica e quase estática das principais forças básicas. É protegido contra a corrosão e contra infiltrações de água ou fluido de corte.

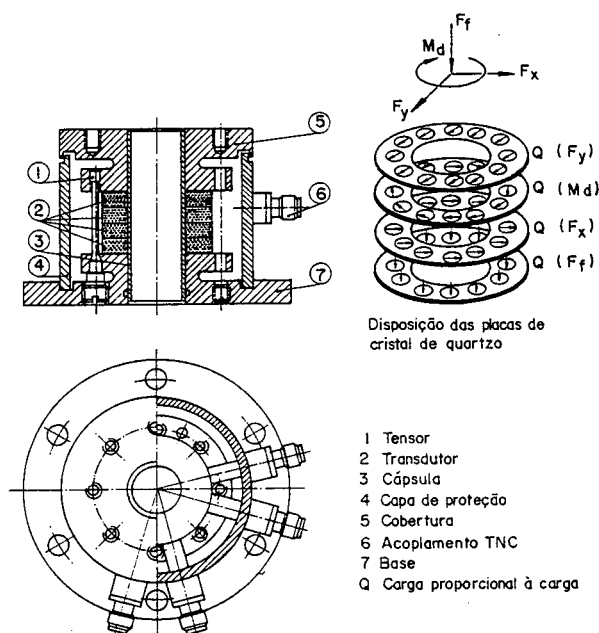


Figura 3.5 - Dinamômetro piezelétrico a quatro componentes [24]

3.6.2. Amplificador de Sinais [42]

Para transformar as cargas elétricas em tensões proporcionais às forças aplicadas, é empregado o amplificador da Kistler Instrumente A.G., modelo 5006. O amplificador possui doze (12) faixas de medição em Unidades Mecânicas por Volt, com três constantes de tempo reguláveis e filtros eficazes para adaptação da gama de frequência ao grau de medição desejado.

3.6.3. Unidade de Controle e Aquisição de Dados [43]

A aquisição dos dados é realizada automaticamente através de uma unidade de controle e aquisição de dados da Hewlett-Packard, modelo 3497 A, onde os sinais elétricos gerados no dinamômetro após sua amplificação são convertidos em sinais digitais.

3.6.4. Microcomputador [44]

Após a captação dos sinais digitais emitidos pela unidade de controle e aquisição de dados, um microcomputador da Hewlett-Packard, modelo HP-85, utilizando um "software" específico elaborado por Rocha [45] e Moreira [46], realiza o processamento e a documentação dos dados do ensaio.

3.7. Regulagem e Verificação do Gume do Alargador

Os gumes dos insertos empregados nos alargadores utilizados nos ensaios são verificados antes dos ensaios. Esta verificação deve ser feita em equipamentos que permitam a visualização de possíveis danos existentes nos gumes, pois estes alteram a qualidade dos furos. Da mesma forma, a regulagem do diâmetro e da inclinação do gume das ferramentas é realizada em equipamentos que possibilitem elevada precisão.

Os dados técnicos dos equipamentos empregados se encontram no Anexo 3.

3.7.1. Metroscópio Horizontal [47]

O metroscópio horizontal da Carl Zeiss, modelo ULM 02-600, é utilizado para regular o diâmetro e a inclinação do gume das ferramentas antes e durante a realização dos ensaios.

3.7.2. Microscópio de Ferramentaria

Um microscópio de ferramentaria da Nikon, modelo Measurescope, é utilizado para verificar o estado do gume dos insertos quanto a possíveis lascamentos ou desgaste antes da regulagem dos mesmos e durante a realização dos ensaios.

3.7.3. Grande Microscópio de Ferramentaria [48]

Este equipamento da Carl Zeiss foi utilizado para determinar o ângulo de incidência (α_0) dos insertos dos alargadores de gume único.

3.8. Verificação da Qualidade dos Furos

Para a determinação da qualidade superficial, precisão de forma e dimensional dos furos ensaiados, foram empregados os equipamentos descritos abaixo. No Anexo 3 são encontrados os dados técnicos dos mesmos.

3.8.1. Micrômetro Interno

Um micrômetro interno da Tesa é utilizado para realizar as leituras dos diâmetros dos furos ensaiados.

3.8.2. Rugosímetro [49]

As leituras da rugosidade (R_a) e rugosidade (R_t) da superfície dos furos ensaiados são realizadas por um rugosímetro da Feinpruef GmbH, modelo Perthometer M3A.

3.8.3. Circularímetro [50]

Para a medição da circularidade dos furos obtidos é utilizado um circularímetro da Feinpruef GmbH, modelo Formmeter MM02/Makrograph FlA.

3.8.4. Máquina de Medir por Coordenadas [51]

A máquina de medir por coordenadas da Carl Zeiss, modelo ZMC 550, é utilizada para medir a circularidade e a cilindricidade dos furos ensaiados.

3.9. Calibração do Sistema de Medição das Forças de Usinagem

A calibração do sistema de medição da força de avanço (F_f) e do momento torçor (M_d) seguiu os procedimentos adotados por Schroeter [7], Rocha [45] e Godoy Ramsay [52].

Esta calibração é necessária para que, obtendo-se o levantamento da curva de erros sistemáticos, possam ser corrigidas as leituras das forças de usinagem realizadas durante os experimentos pelo sistema de medição.

Para a aquisição e tratamento dos dados de força, é utilizado um "software" específico desenvolvido por Rocha [45] e

Moreira [46], que permite determinar a função transferência e a curva de erro sistemático.

3.10. Determinação das Variáveis do Processo

Como variáveis do processo de alargamento com alargadores de gume único denomina-se a velocidade de corte (v_c), o avanço (f), a sobremedida de usinagem (a), o ângulo de saída (γ_o), a inclinação do gume (Δ) e o fluido de corte. Também pretende-se determinar a influência da alimentação do fluido de corte aplicado externa e internamente.

3.10.1. Velocidade de Corte

MATERIAL v _c (m/min)	Duralumínio	Alumínio Si<5%	Alumínio Aeronáutico	Bronze
alim. exter.	8	a 30		6 a 20
alim. inter.	20	a 70	-	50 a 70
	[12,13,17]		[7]	[12,13,17]

TABELA 3.1 - Velocidades de corte recomendadas para o alargamento das ligas de alumínio e bronze.

Estes valores também são recomendados por Kress [1,6], Striegl [15] e por Mapal [14].

3.10.2. Avanço

MATERIAL f (mm/rot)	Duralumínio	Alumínio Si<5%	Alumínio Aeronáutico	Bronze
alim. exter.	0,1 a 0,3	0,1 a 0,5		0,1 a 0,3
alim. inter.	0,1 a 0,3	-		0,1 a 0,3
	[12,13,17]		[7]	[12,13,17]

TABELA 3.2 - Avanços recomendados para o alargamento das ligas de alumínio e bronze.

Estas recomendações coincidem, com algumas variações, com as fornecidas por Kress [1,6], Striegl [15] e Mapal [14].

3.10.3. Sobremedida de Usinagem

MATERIAL	Duralumínio	Alumínio Si<5%	Alumínio Aeronáutico	Bronze
SOBREMED. a (mm)	0,1 a 0,3	0,2 a 0,5	0,1 a 0,3	0,2 a 0,5
	[12,13,17]		[7]	[12,13,17]

TABELA 3.3 - Sobremedidas de usinagem recomendadas para o alargamento das ligas de alumínio e bronze.

Striegl [15] recomenda sobremedidas de usinagem para duralumínio e alumínio com baixo teor de silício com valores entre 0,2 e 0,5 mm.

3.10.4. Ângulo de Saída

MATERIAL	Duralumínio		Alumínio Si<5%		Alumínio Aeronáut.		Bronze	
FERRAM.	MD	PKD	MD	PKD	MD	PKD	MD	PKD
ÂNGULO DE SAÍDA	6°-10° [35]	0° [35]	6°-10° [35]	0° [35]	6°-15° [7]	0° [7]	5°-7° [5]	
γ _o	15° [12,13,17]		0° e 15° [12,13,17]				6° [1] 15° [12,13,17]	

TABELA 3.4 - Ângulos de saída recomendados para o alargamento de ligas de alumínio e bronze.

3.10.5. Inclinação do Gume

O fabricante da ferramenta [12,13,17] recomenda valores de inclinação do gume entre 0,008 e 0,010 mm em cada 10 mm de comprimento de lâmina. Striegl [15] recomenda valores entre 0,010 e 0,020 mm para o comprimento total da lâmina.

Schroeter [7] realizou ensaios dentro destas faixas para as ligas de alumínio aeronáutico e determinou que uma inclinação ideal varia em torno de 0,010 mm em cada 10 mm de comprimento de lâmina.

3.10.6. Fluido de Corte

São recomendados como fluido de corte na usinagem de ligas de alumínio as emulsões de óleo em concentração mínima de 10 % [8,12,15,17] e os óleos de corte [11,12,13,17]. Miller [11] também recomenda a utilização de querosene como fluido de corte.

Na usinagem das ligas de alumínio aeronáutico, os melhores resultados foram obtidos com a aplicação de óleos de corte [7].

3.11. Metodologia Empregada

Na realização dos ensaios, é verificada a influência das variáveis de processo sobre as forças de usinagem e a qualidade final dos furos alargados, representada pelo acabamento superficial (rugosidade), qualidade de forma (circularidade e cilindricidade) e qualidade dimensional (diâmetro/tolerância). Para tanto, deve ser feita uma combinação das variáveis de maneira que apenas uma delas varie, e mantenham-se as outras variáveis constantes.

De uma forma geral, nos ensaios realizados com o fluido de corte sendo aplicado de forma externa, as condições de usinagem foram baseadas nos resultados do trabalho realizado por Schroeter [7] nas ligas de alumínio aeronáutico.

Para as ferramentas com alimentação interna do fluido de corte, os experimentos são iniciados com valores intermediários aos

fornecidos pela literatura (como é o caso das velocidades de corte, avanços e sobremedidas de usinagem).

Por motivos estatísticos [53], o número mínimo de repetições de cada conjunto de variáveis independentes deveria ser igual a três. Em decorrência do grande número de ensaios a serem realizados, a adoção desta metodologia se torna muito dispendiosa [24].

Nos primeiros ensaios, cada combinação de variável independente será repetida duas vezes. Ao se constatar a repetibilidade nos valores dos ensaios, os próximos serão realizados apenas uma vez. No caso de dúvida quanto aos resultados, o ensaio será repetido. Se alguma combinação de variáveis testada apresentar qualidade de furos muito inferior em relação às outras, esta será abandonada.

C A P Í T U L O 4

EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

4.1. Preparação dos Ensaio

Preliminarmente à realização dos ensaios, algumas etapas de significativa importância devem ser cumpridas para que haja um bom desenvolvimento e acompanhamento dos mesmos.

4.1.1. Corpos de Prova

Todos os corpos de prova foram codificados de forma a ser facilmente identificado o seu material, o lote de fabricação e a sequência de numeração.

Exemplo: Al 7075 - 10
Lote 01

Os furos realizados nos corpos de prova foram devidamente numerados de forma a se acompanhar a sua sequência e também os parâmetros de usinagem empregados nos mesmos.

4.1.2. Controle dos Ensaios

Para um controle eficiente dos ensaios, foi elaborado um formulário de acompanhamento (Anexo 4). Neste formulário documenta-se as informações sobre o corpo de prova, o material e a geometria da ferramenta, as condições de corte empregadas em cada furo, forma de aplicação do fluido de corte e outros.

4.1.3. Sequência de Usinagem

Para a preparação dos furos nos corpos de prova adotou-se a seguinte sequência de usinagem:

- furo de centro;
- furação com broca helicoidal;
- alargamento de preparação com alargador convencional;
- alargamento final com alargador de gume único.

Esta sequência de usinagem tem o objetivo de manter constantes as condições de preparação dos furos, de modo que qualquer alteração das características dos furos alargados se deva somente à operação de alargamento final [7].

A operação de alargamento de preparação foi empregada por Schroeter [7] para obtenção de furos com tolerância de fabricação IT7 e diâmetro conhecido, podendo, deste modo, ser controlada a quantidade de material removido na operação final de alargamento. Esta operação foi realizada em todos os ensaios.

4.1.4. Medição das Forças na Usinagem

Para a realização dos ensaios, o sistema de medição das componentes da força de usinagem foi montado no Centro de Usinagem nb-h 65, conforme item 3.6.

Para a aquisição das forças na usinagem (momento torçor e força de avanço), utilizou-se o "software" citado em 3.6.4. Para cada ensaio, foram armazenados os dados das características da ferramenta empregada e do material usinado, os valores para a correção do erro sistemático, as condições de usinagem, escalas de amplificação e outros.

Este programa tem a característica de tomar dez (10) leituras da força de avanço e do momento torçor durante a operação de alargamento. O programa faz um tratamento estatístico dos dados colhidos e como resultados fornece a média dos valores e o desvio padrão. Após a realização da leitura dos dados, estes são apresentados na tela do microcomputador e também armazenados em fita magnética, possibilitando assim uma análise posterior.

4.1.5. Procedimentos-Padrões

Para a realização dos ensaios, após a montagem do sistema de medição, verificação das condições de funcionamento da máquina-ferramenta, ferramentas utilizadas e introdução do programa de usinagem no comando, foram observados os seguintes procedimentos:

- 1 - Fixar e preparar corpo de prova para o ensaio.
- 2 - Iniciar a usinagem de preparação dos furos.
- 3 - Introduzir os dados constantes e variáveis relativos ao ensaio no programa de aquisição de dados.
- 4 - Fornecer os valores de avanço e velocidade de corte utilizados no ensaio.
- 5 - Preparar o sistema de medição para coletar os dados.
- 6 - Iniciar a usinagem de alargamento final.
- 7 - Verificar, na tela do microcomputador, a coerência dos valores medidos.
- 8 - Gravar valores ou repetir o ensaio.
- 9 - Repetir os procedimentos para o próximo ensaio.

4.2. Realização dos Ensaios

Inicialmente, foram realizados ensaios completos, isto é, empregando todos os parâmetros de usinagem e seus respectivos escalonamentos estabelecidos, com o alargador de gume único de 12,0 mm de diâmetro, sendo o material de ensaio a liga de alumínio aeronáutico 2024-T351. Estes ensaios foram necessários para determinar-se os valores dos parâmetros que possibilitam a obtenção dos melhores resultados de qualidade dos furos e também das componentes da força de usinagem.

Nos ensaios com as ligas de alumínio 2011-T3, 6061-T6, 6262-T9, 7075-T651 e bronze TM-23, empregaram-se os parâmetros de

usinagem que possibilitaram a obtenção dos melhores resultados de qualidade de furo e força de usinagem.

Com os alargadores de gume único de 15,0 e 24,0 mm foram realizados apenas ensaios complementares para verificação do comportamento das forças de usinagem com a variação do diâmetro da ferramenta na liga de alumínio 2024-T351.

4.3. Parâmetros de Usinagem e Variáveis do Processo

4.3.1. Velocidade de Corte

Para a determinação do escalonamento das velocidades de corte, seguiu-se a orientação dada pela série de números normalizados [54].

O intervalo das velocidades de corte utilizadas foi determinado através das informações do item 3.10.1 e de Schroeter [7].

Escolheram-se as seguintes velocidades de corte:

- Com alimentação externa do fluido de corte

$$v_c = 25,0; 31,5; 35,5; 40,0 \text{ m/min}$$

- Com alimentação interna do fluido de corte

$$v_c = 50,0; 71,0; 90,0; 110,0 \text{ m/min}$$

Os furos usinados com as velocidade de corte onde se empregam alargadores com alimentação interna do fluido de corte apresentaram características piores e/ou no máximo apenas semelhantes àsquelas obtidas com a alimentação externa do fluido de corte. Quanto maior a velocidade de corte, pior a qualidade apresentada pelos furos. Isto se deve, principalmente, à pouca pressão do fluido de corte (200 kPa). Como consequência, temos que o cavaco não é retirado convenientemente da região de corte. Devido a isto, abandonaram-se as velocidades de corte elevadas e empregaram-se velocidades de corte iguais às utilizadas com a alimentação externa de fluido de corte.

4.3.2. Avanço

Para os ensaios realizados com alimentação externa de fluido de corte escolheram-se [54] os seguintes avanços:

$$f = 0,315; 0,40; 0,50 \text{ mm/rot.}$$

Conforme o item 3.10.2, são possíveis avanços no intervalo de 0,10 a 0,50 mm/rot. Sabe-se que avanços pequenos promovem características de furo melhores. Isto foi verificado também por Schroeter [7]. Optou-se pelo limite superior do intervalo para verificar a possibilidade de se conseguir características de furos semelhantes às encontradas com avanços menores, porém com tempos de usinagem menores.

Nos ensaios realizados com o fluido de corte sendo alimentado de maneira interna, os avanços escolhidos [54] foram os seguintes:

$$f = 0,10; 0,20; 0,315; 0,40 \text{ mm/rot.}$$

4.3.3. Sobremedida de Usinagem

Schroeter [7] verificou que, para valores de sobremedida de usinagem muito pequenos ($a = 0,1 \text{ mm}$), ocorreram problemas de vibração e de falhas na superfície usinada. Verificou também que em valores de sobremedida de usinagem elevados (maiores que $0,3 \text{ mm}$) houve aumento das forças de usinagem e um aumento de vibrações até a níveis audíveis. Devido a isto, restringiram-se os valores da sobremedida de usinagem utilizadas nos ensaios para $0,2$ e $0,3 \text{ mm}$.

4.3.4. Inclinação do Gume

Valores de inclinação do gume maiores que $0,01 \text{ mm}/10 \text{ mm}$ de comprimento de gume, apesar de reduzirem os momentos torçores e as forças de avanço, aumentam a rugosidade da parede dos furos. Por outro lado, valores de inclinação do gume menores que $0,01 \text{ mm}/10 \text{ mm}$ de comprimento de gume melhoram a qualidade superficial do furo. Em contrapartida, aumentam sensivelmente as forças de usinagem pelo

aumento das forças de atrito, decorrentes do aumento do contato do gume secundário com a parede do furo [7].

Desta maneira, estabeleceu-se como inclinação do gume (Δ) o valor de 0,01 mm/10 mm de comprimento de gume para todos os nsaios.

4.3.5. Ângulo de Saída

Schroeter [7] encontrou os melhores resultados com ângulos de saída de 15° para insertos de metal-duro e 0° para insertos de PKD no alargamento de alumínio aeronáutico.

Foram realizados ensaios com ângulos de saída de 0°, 6° e 15° para insertos de metal-duro, e de 0° para insertos de PKD na usinagem das ligas de alumínio.

Com os insertos de metal-duro possuindo ângulo de saída de 0° e 6°, obtiveram-se qualidades de furos muito inferiores às obtidas nos furos realizados com insertos de metal-duro com $\gamma_0 = 15^\circ$ e de PKD com $\gamma_0 = 0^\circ$. Devido a isto, estes ângulos de saída foram abandonados.

Para o alargamento de bronze, foram empregados insertos de metal-duro com ângulo de saída de 15°, conforme indicação do fabricante [12,13,17,19].

4.3.6. Fluido de Corte

Segundo Schroeter [7], no alargamento de ligas de alumínio, os óleos de corte proporcionam melhores resultados de qualidade superficial e menores forças de avanço e momento torçor.

Para a realização dos ensaios, empregou-se como fluido de corte o óleo de corte CUT-MP60 da Bardhal.

4.4. Determinação da Qualidade Obtida nos Furos

4.4.1. Coleta dos Dados de Ensaio

A utilização de folhas de ensaios é um meio eficaz de controle dos ensaios. Foram utilizadas folhas de ensaio elaboradas por Schroeter [7] onde, além dos parâmetros de usinagem empregados, geometria e tipo da ferramenta, corpo de prova utilizado, etc, são transcritos os resultados coletados dos ensaios de força de usinagem, acabamento superficial, tolerância dimensional, de forma e outros (Anexo 5).

4.4.2. Rugosidade

A rugosidade foi medida em três pontos diferentes em cada furo. Onde os valores das medições diferiam muito, realizou-se um número maior de medições. O resultado foi considerado como sendo a média dos valores das medições [7].

4.4.3. Erros de Circularidade

A circularidade apresentada pelos furos foi medida em três posições diferentes ao longo do seu comprimento para se ter uma boa caracterização da geometria dos mesmos. Como medida da circularidade foi considerado o maior valor encontrado. Foram medidos os furos que melhor caracterizavam a variação da qualidade com a variação das condições de usinagem.

4.4.4. Erros de Cilindricidade

Para uma boa caracterização da cilindricidade apresentada pelos furos, foram realizadas medições em quatro posições diferentes ao longo dos mesmos. Foi considerada como medida da cilindricidade o maior desvio apresentado pelo furo em relação a um furo-padrão geometricamente perfeito. A cilindricidade foi medida

nos mesmos furos onde foi realizada a medição da circularidade (item 4.4.3).

4.4.5. Sobremedida dos Furos

A sobremedida dos furos, que é a diferença entre o diâmetro da ferramenta e o diâmetro do furo após o alargamento, foi verificada em três alturas diferentes [7].

A verificação do diâmetro dos furos ensaiados tem como finalidade a determinação da variação dos parâmetros de usinagem sobre o campo de tolerância determinado pela regulagem da ferramenta.

4.5. Regulagem dos Alargadores de Gume Único

Para a regulagem do diâmetro dos alargadores e da inclinação do gume, o fabricante recomenda reapertar o parafuso de fixação (a) (Figura 4.1) com o gume a aproximadamente 0,02 mm da medida final. Como norma para os ensaios, convencionou-se reapertar o parafuso de fixação com o gume a 0,01 mm da medida final [7].

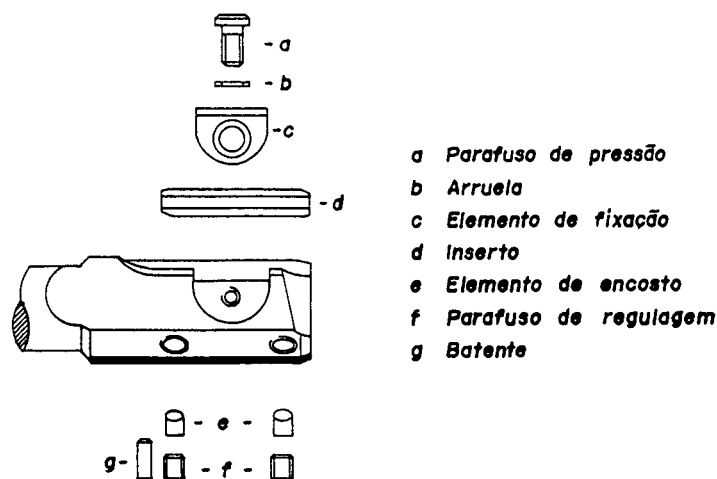


Figura 4.1 - Construção do alargador de 12,0 mm de diâmetro [14]

Esta recomendação, para o alargador com diâmetro de 12,0 mm, ocasiona uma flexão do inserto, como pode ser visto na Figura 4.2. Esta flexão do inserto, durante o alargamento, causa um aumento excessivo do diâmetro e piora da rugosidade do furo na sua porção inicial. Isto se deve ao sistema de fixação do inserto na ferramenta.

Neste diâmetro de ferramenta [13], o inserto é fixado diretamente sobre o corpo do alargador pelo parafuso de fixação (a). Os elementos de encosto (e) realizam pressão, durante a regulação, diretamente sobre o inserto, em dois pontos ao lado do parafuso de fixação.

Reapertando-se o parafuso de fixação com o gume a aproximadamente 0,005 mm da medida final do diâmetro da ferramenta, conseguiu-se minimizar e até mesmo eliminar esta flexão do inserto (Figura 4.3).

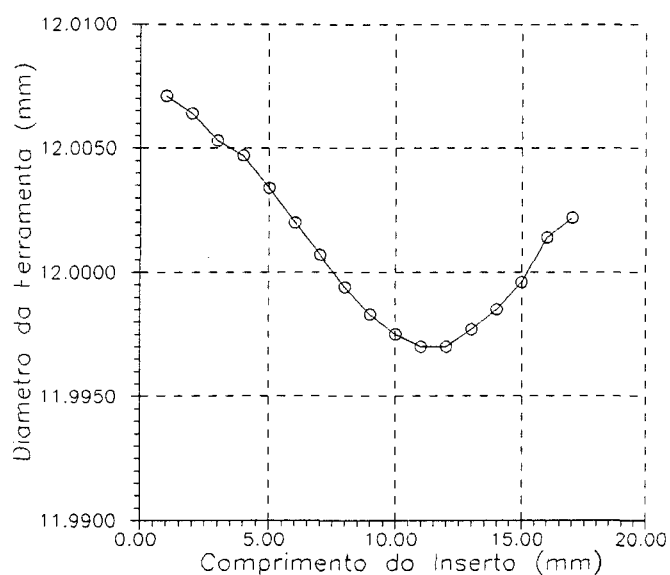


Figura 4.2 - Condição do inserto com o aperto final a 0,01 mm da medida final

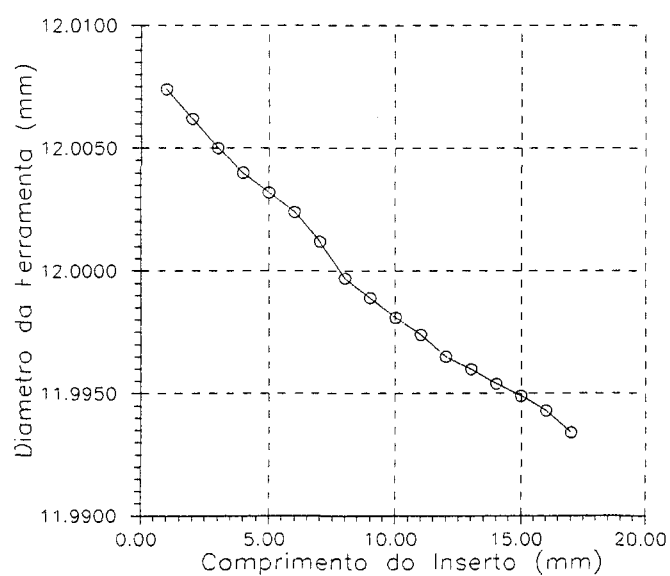


Figura 4.3 - Condição do inserto com o aperto final a 0,005 mm da medida final

Adotou-se, então, para a regulagem do diâmetro e da inclinação do alargador de 12,0 mm empregado nos ensaios, o reaperto do parafuso de fixação com o gume a aproximadamente 0,005 mm da medida final desejada.

Os alargadores com diâmetro de 15,0 e 24,0 mm, por possuírem um sistema diferente de fixação do inserto (Figura 2.5), onde o inserto é colocado em um suporte e então os dois são fixados no corpo do alargador, não apresentaram o problema de flexão do inserto.

4.6. Modo de Retirada da Ferramenta do Furo

Inicialmente, durante a operação de alargamento final com alargadores de gume único, promoveu-se a retirada da ferramenta do furo de forma rápida. Esta operação ocasiona o aparecimento de marcas espirais na parede do furo, as quais aumentam sensivelmente a rugosidade da mesma.

Realizaram-se, então, ensaios retirando-se a ferramenta do furo com a mesma velocidade de avanço de entrada. Apesar de melhorar consideravelmente o acabamento superficial do furo, este procedimento, além de elevar o tempo de usinagem, promove um aumento excessivo do diâmetro do furo, ultrapassando o limite superior de tolerância estabelecido pela regulagem da ferramenta.

Os melhores resultados quanto a tempo de usinagem, rugosidade e tolerância dimensional foram obtidos retirando-se a

ferramenta sem giro e com elevada velocidade de avanço do furo.
Este procedimento foi usado em todos os ensaios.

C A P Í T U L O 5

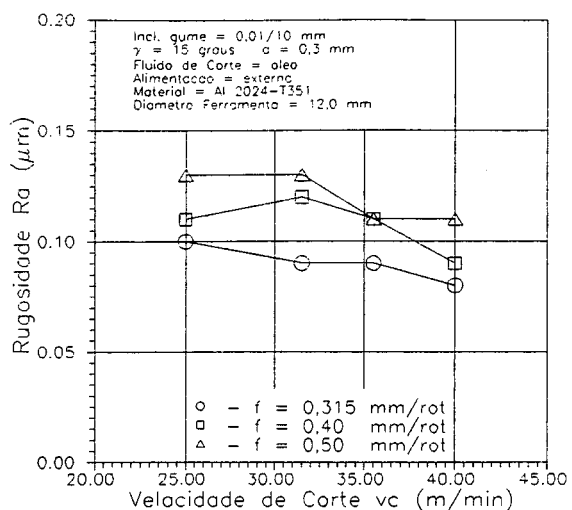
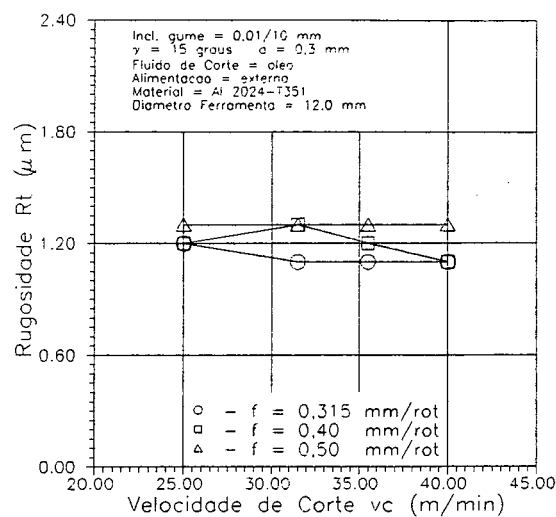
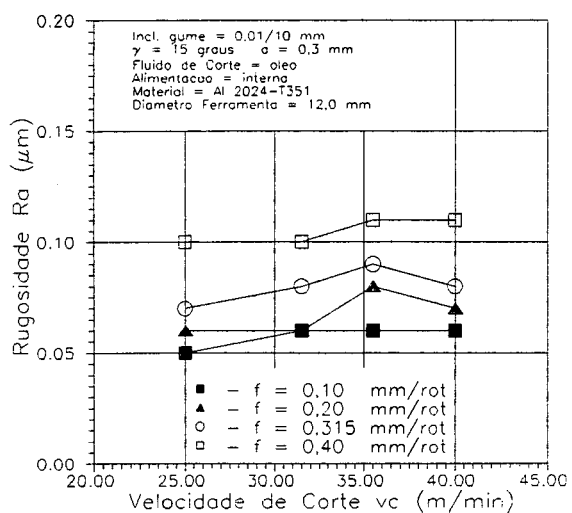
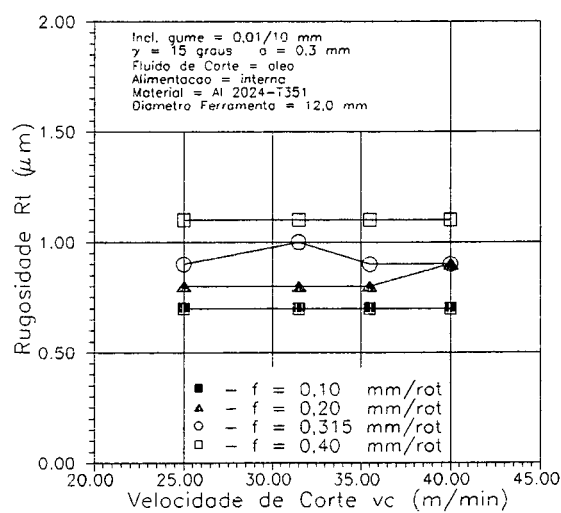
ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Influência das Variáveis de Entrada sobre a Rugosidade

5.1.1. Influência da Velocidade de Corte

Os gráficos 1, 2, 3 e 4 da Figura 5.1 mostram o comportamento da qualidade superficial com a variação da velocidade de corte.

Analizando-se os resultados encontrados para a rugosidade R_a e R_t dentro do intervalo de velocidades de corte testado, conclui-se que a velocidade de corte não demonstra ter influência significativa sobre o acabamento superficial, percebendo-se uma tendência a valores constantes de rugosidade R_a e R_t . Schroeter [7] também encontrou essa tendência em seus ensaios.

Gráfico 1 - Ra x v_c Gráfico 2 - Rt x v_c Gráfico 3 - Ra x v_c Gráfico 4 - Rt x v_c Figura 5.1 - Influência de v_c sobre Ra e Rt

5.1.2. Influência do Avanço

Segundo Stemmer [10], o avanço tem um efeito muito significativo sobre a qualidade do acabamento superficial. Há um aumento considerável da rugosidade com o aumento do avanço. Em seus ensaios, Schroeter [7] percebeu que, dentro do intervalo de avanços testados, praticamente não houve uma variação da rugosidade.

Os gráficos 5, 6, 7 e 8 da Figura 5.2 apresentam os resultados dos ensaios realizados e revelam uma tendência de aumento da rugosidade com o aumento do avanço.

Esta diferença no comportamento da rugosidade em comparação com os resultados obtidos por Schroeter [7] se deve à diferença na geometria dos insertos utilizados. Schroeter [7] empregou insertos com ângulos de direção menores ($\chi_{r1} = 15^\circ$ e $\chi_{r2} = 3^\circ$) e um comprimento de chanfro maior ($L = 3,0$ mm), o que proporciona uma entrada da ferramenta e um corte de material mais suaves [16].

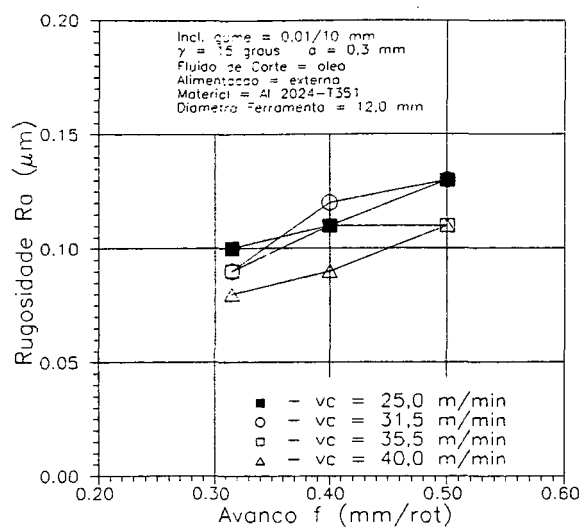


Gráfico 5 - Ra x f

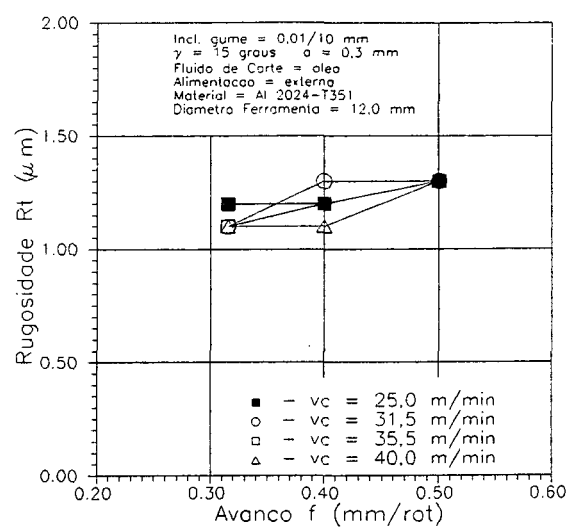


Gráfico 6 - Rt x f

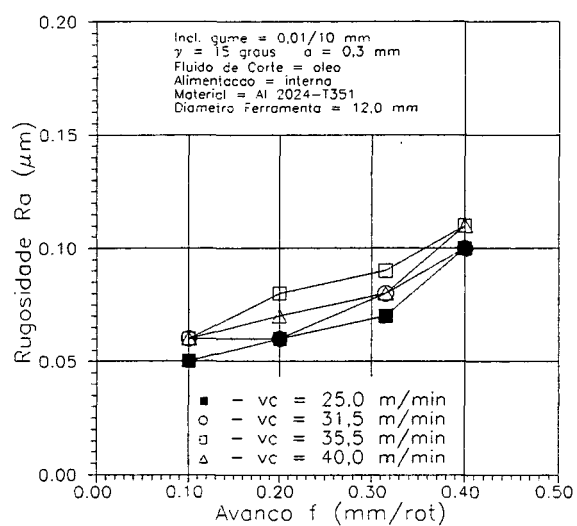


Gráfico 7 - Ra x f

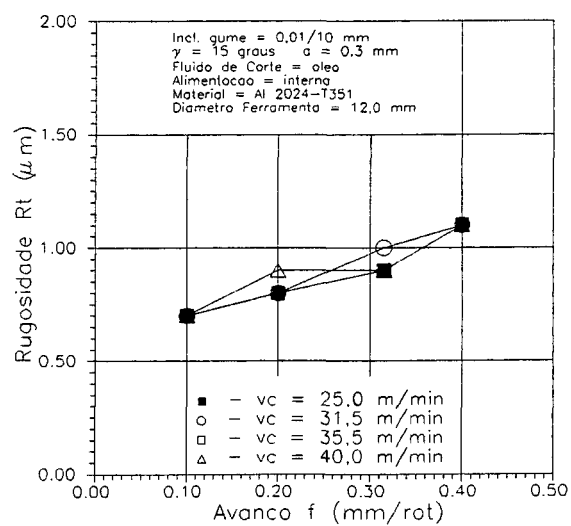


Gráfico 8 - Ra x f

Figura 5.2 - Influência de f sobre Ra e Rt

5.1.3. Influência da Sobremedida de Usinagem

A quantidade de material a remover tem uma grande influência sobre a qualidade superficial. Segundo Schroeter [7], para valores pequenos de sobremedida de usinagem ($a = 0,1$ mm) não há um corte efetivo de material, mas apenas um esmagamento, e para grandes profundidades (maiores que 0,3 mm) ocorre aumento das forças de usinagem e vibrações audíveis.

Os resultados dos ensaios mostram não haver uma variação significativa na rugosidade para os valores de sobremedida de usinagem empregados ($a = 0,2$ mm e 0,3 mm). Nos gráficos 9, 10, 11 e 12 da Figura 5.3 se percebe que há uma pequena melhora dos valores da rugosidade para $a = 0,3$ mm. Para esta sobremedida de usinagem há uma melhor condição para a retirada de material (corte), conseguindo-se, desta maneira, eliminar melhor as marcas de usinagem anterior (alargamento de preparação ou simples furação com broca).

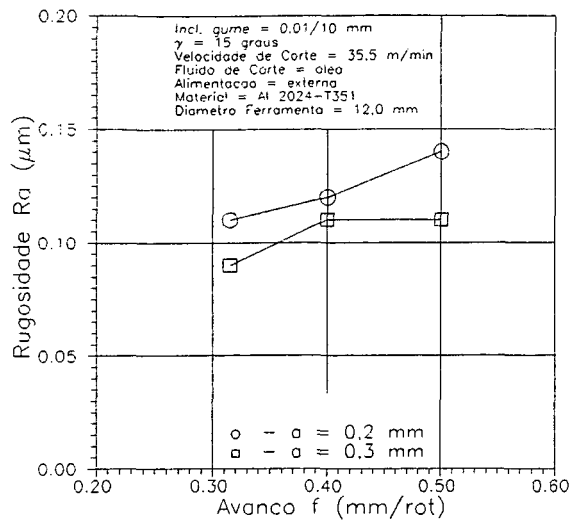


Gráfico 9 - Ra x f

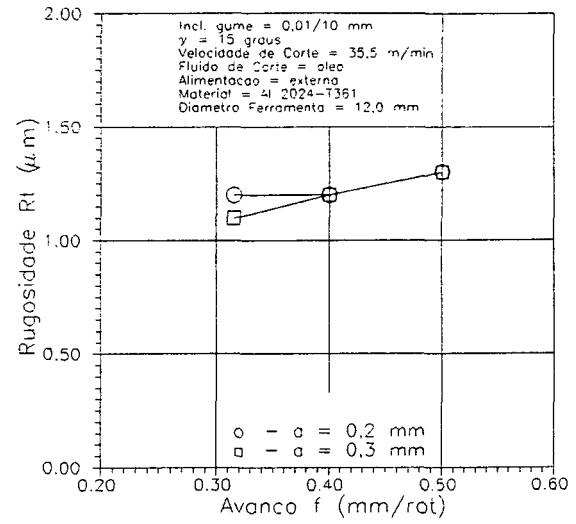


Gráfico 10 - Rt x f

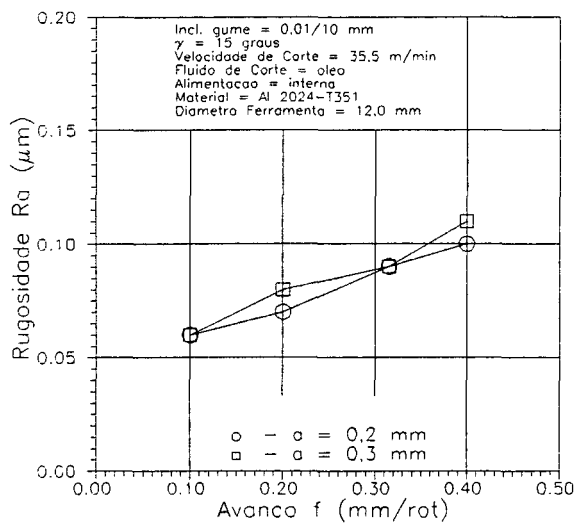


Gráfico 11 - Ra x f

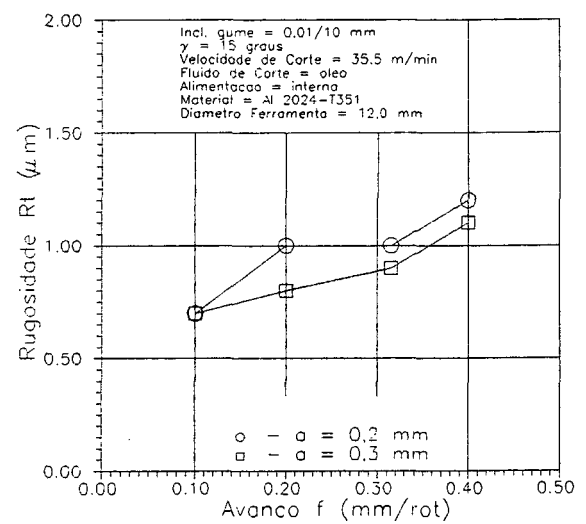
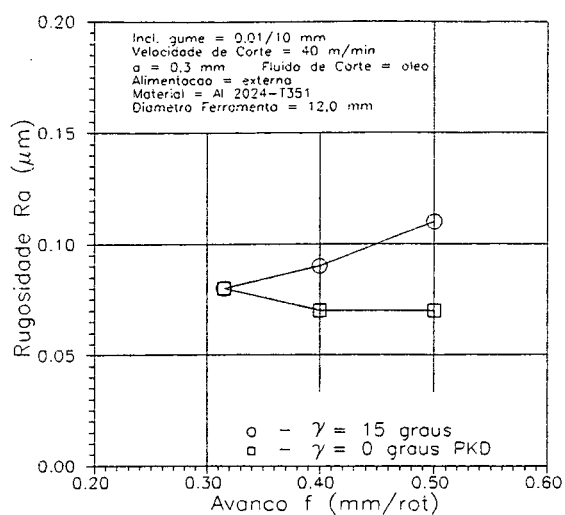
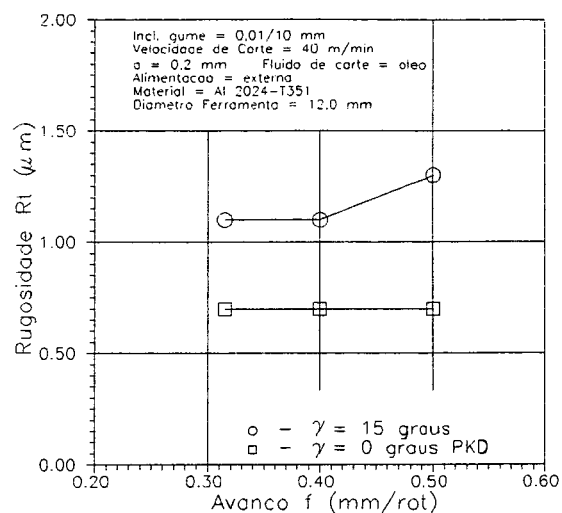
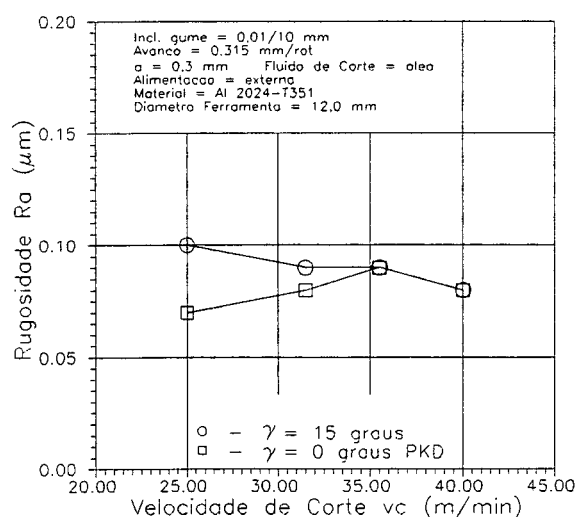
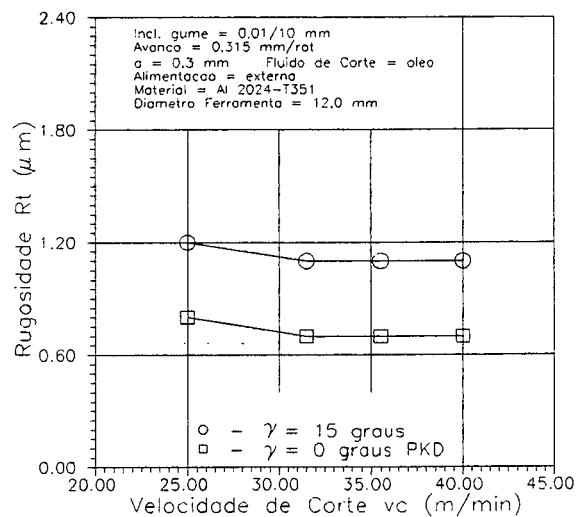


Gráfico 12 - Rt x f

Figura 5.3 - Influência de "a" sobre R_a e R_t

5.1.4. Influência do Ângulo de Saída

O alumínio, por ser um material dúctil, exige para a sua usinagem ângulos de saída positivos de até 15° [12,13,17]. Nos ensaios realizados, empregaram-se ângulos de saída de 15° (metal-duro) e de 0° (PKD - diamante policristalino). Nas curvas apresentadas nos gráficos 13, 14, 15 e 16 da Figura 5.4, podemos verificar que os melhores resultados quanto à rugosidade são obtidos com o ângulo de saída de 0° -PKD. Isto se deve ao diamante possuir, como ferramenta de corte, gumes mais afiados e também um menor coeficiente de atrito com os cavacos em relação ao metal-duro ($\gamma_0 = 15^\circ$), proporcionando, deste modo, um melhor corte e saída do material da peça sobre a face da ferramenta.

Gráfico 13 - $Ra \times f$ Gráfico 14 - $Rt \times f$ Gráfico 15 - $Ra \times v_c$ Gráfico 16 - $Rt \times v_c$ Figura 5.4 - Influência de γ_0 sobre Ra e Rt

5.1.5. Influência da Forma de Alimentação do Fluido de Corte

Nos gráficos 17, 18, 19 e 20 da Figura 5.5 estão representadas as curvas de rugosidades para a alimentação interna e externa do fluido de corte.

Dentre as suas várias funções, o fluido de corte deve retirar os cavacos formados da região de corte. Na alimentação interna do fluido de corte, isso acontece com maior eficiência, pois o fluido é levado diretamente até o gume da ferramenta. Dessa maneira, os riscos provocados nas paredes dos furos pelos cavacos retirados são minimizados, obtendo-se com isso uma melhor qualidade superficial.

Nesse caso, a alimentação interna foi realizada utilizando para isso um suporte pendular (item 3.5), e o fluido de corte foi aplicado com uma pressão de 200 kPa e uma vazão de 40 l/min [40].

Verifica-se nos gráficos, que os melhores resultados quanto à qualidade superficial dos furos são alcançados com o fluido de corte sendo alimentado internamente. Para velocidades de corte mais elevadas (40 m/min, gráfico 19), os valores da rugosidade para alimentação interna e externa se assemelham. Para estas velocidades de corte, a pressão com que o fluido de corte é levado a região de corte deve ser aumentada para que haja uma retirada mais eficiente dos cavacos.

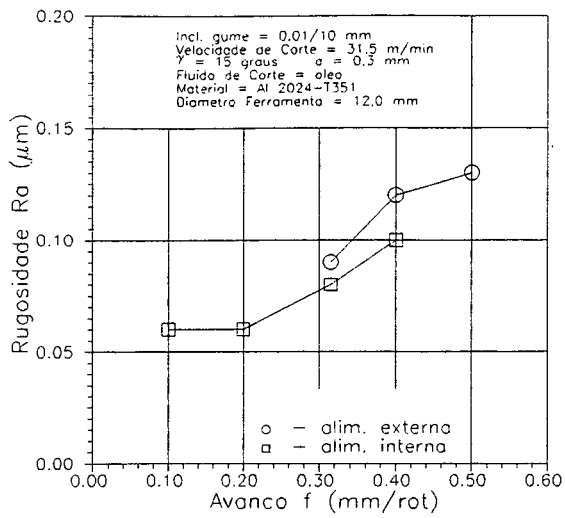


Gráfico 17 - Ra x f

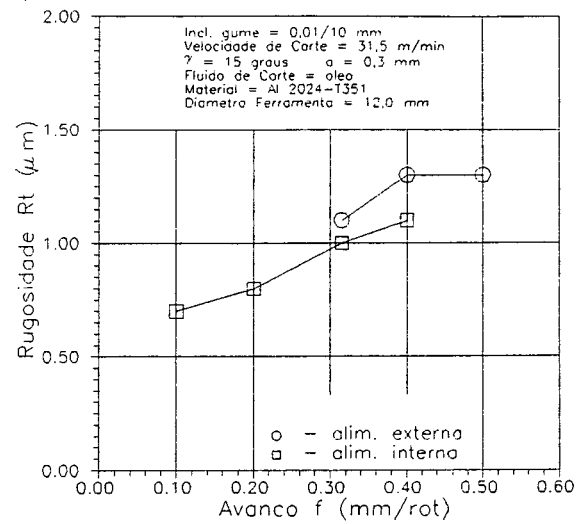
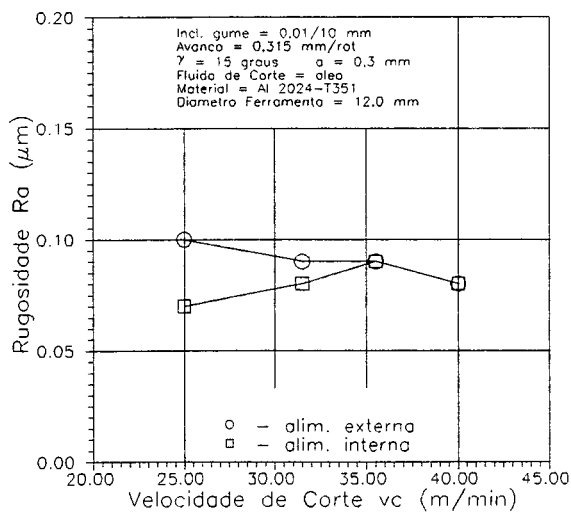
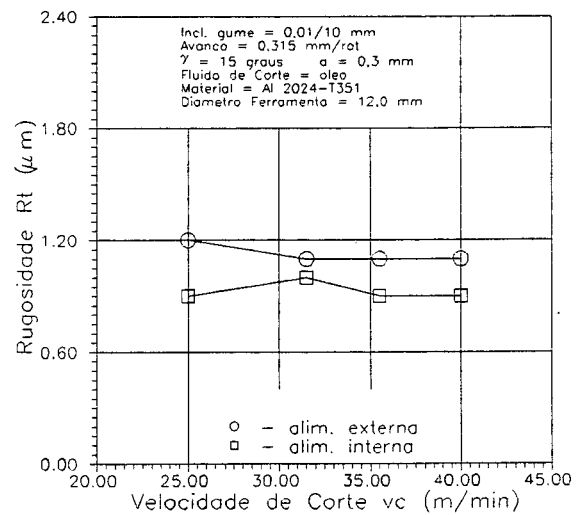
Gráfico 18 - R_t x fGráfico 19 - R_a x v_c Gráfico 20 - R_t x v_c

Figura 5.5 - Influência da forma de alimentação do fluido de corte sobre R_a e R_t

5.2. Influência das Variáveis de Entrada sobre a Circularidade e a Cilindricidade dos Furos

Não se verificaram resultados conclusivos quanto à dependência da circularidade e da cilindricidade de alguma das variáveis do processo de alargamento (velocidade de corte, avanço, sobremedida de usinagem, ângulo de saída e modo de alimentação do fluido de corte) dentro dos limites empregados nos ensaios.

A análise dos resultados das medições de furos realizados com diferentes condições de usinagem apresenta para a circularidade e cilindricidade uma variação de 1 a 4 μm . Os valores da circularidade são idênticos aos valores encontrados por Schroeter [7].

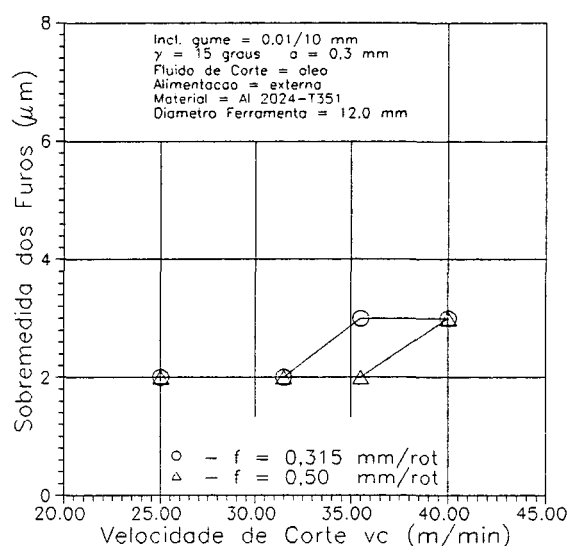
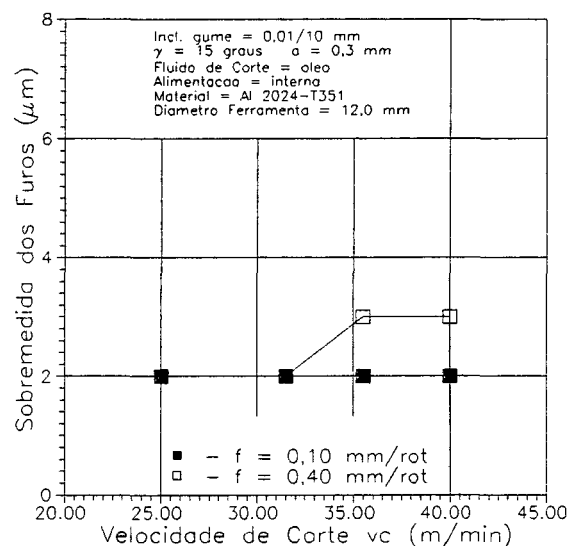
Assim, pode-se concluir que a concepção geométrica da ferramenta tem uma dominância sobre a circularidade e cilindricidade dos furos obtidos.

5.3. Influência das Variáveis de Entrada sobre a Sobremedida dos Furos

5.3.1. Influência da Velocidade de Corte

Analisando-se os valores dos gráficos 21 e 22 da Figura 5.6, não é possível estabelecer conclusões claras sobre a influência da

velocidade de corte sobre a variação dos valores da sobremedida dos furos. Porém, dentro do intervalo de valores testados, a sobremedida dos furos não aparenta ser influenciada pela variação da velocidade de corte.

Gráfico 21 - $\Delta D \times v_c$ Gráfico 22 - $\Delta D \times v_c$ Figura 5.6 - Influência de v_c sobre a sobremedida dos furos

5.3.2. Influência do Avanço

Os gráficos 23 e 24 da Figura 5.7 apresentam a influência do avanço sobre a sobremedida dos furos.

Analisando-se os valores, constata-se uma tendência de elevação da sobremedida dos furos com o aumento do avanço. Este fato pode ser explicado tendo em vista que, com o aumento do avanço aumentam também as forças de usinagem, ocorrendo com isto um aumento do diâmetro do furo.

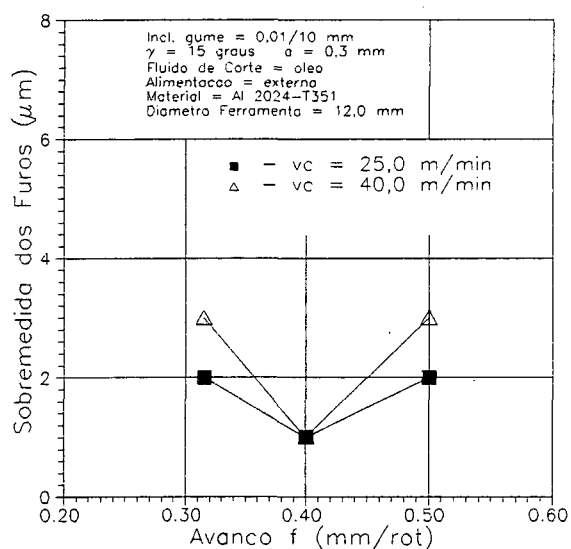


Gráfico 23 - $\Delta D \times f$

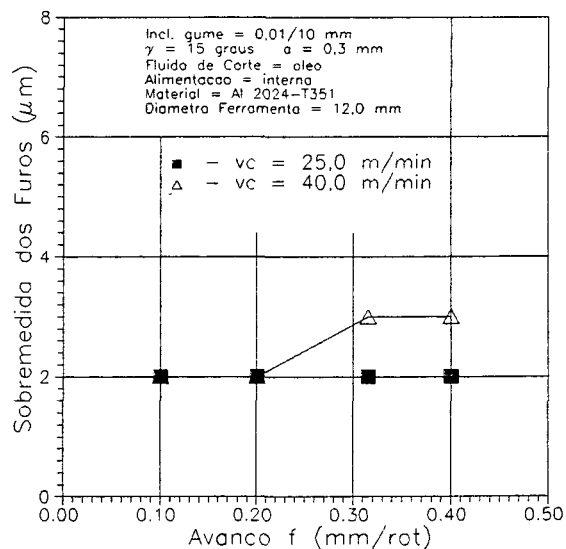


Gráfico 24 - $\Delta D \times f$

Figura 5.7 - Influência de f sobre a sobremedida dos furos

5.3.3. Influência da Sobremedida de Usinagem

A influência da sobremedida de usinagem sobre a sobremedida dos furos é apresentada nos gráficos 25 e 26 da Figura 5.8.

Através da observação dos valores, verifica-se uma diminuição da sobremedida dos furos com o aumento na sobremedida de usinagem. Tais resultados são contrários aos esperados, pois os outros ensaios revelam que com o aumento da seção de usinagem temos um aumento das forças de usinagem, e apesar disto, os valores para a sobremedida dos furos tendem a diminuir.

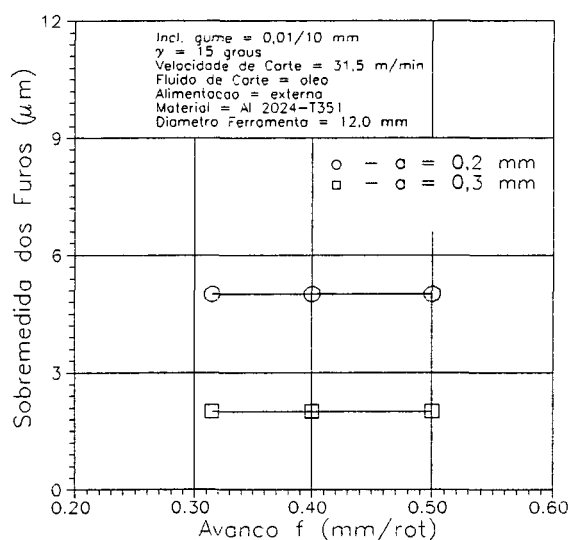


Gráfico 25 - $\Delta D \times f$

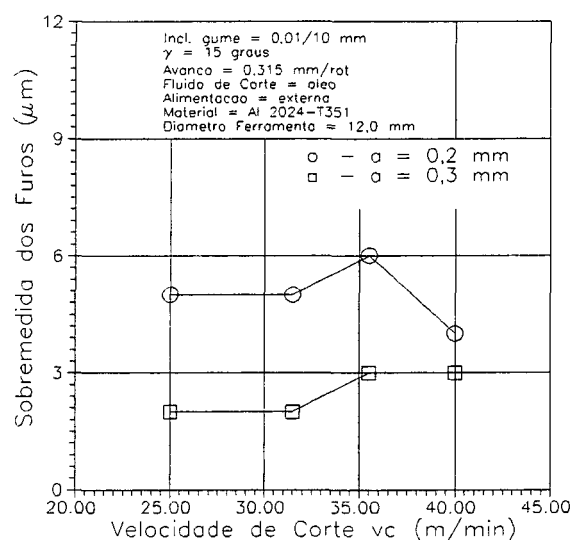


Gráfico 26 - $\Delta D \times v$

Figura 5.8 - Influência de "a" sobre a sobremedida dos furos

5.3.4. Influência do Ângulo de Saída

A Figura 5.9 (gráficos 27 e 28) mostra a influência da variação do ângulo de saída sobre a sobremedida dos furos. Verifica-se que os maiores valores de sobremedida dos furos foram obtidos para $\gamma_0 = 0^\circ$ - PKD e valores menores para $\gamma_0 = 15^\circ$ (metal-duro). Schroeter [7] também constatou isso em seus ensaios.

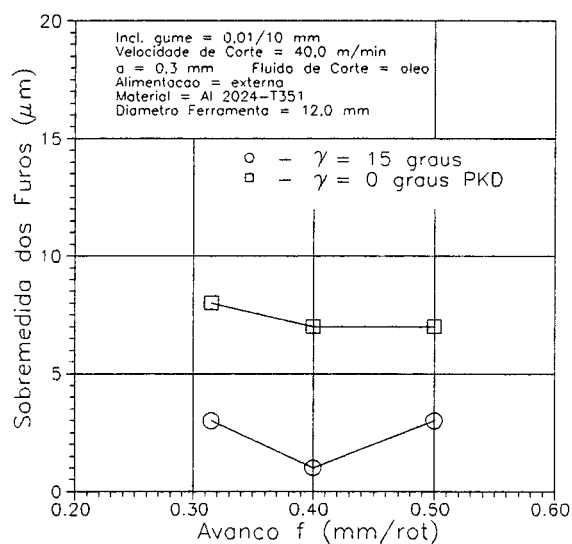


Gráfico 27 - $\Delta D \times f$

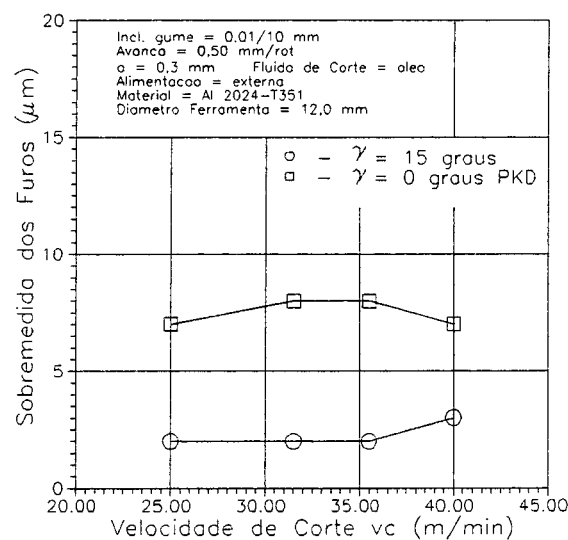


Gráfico 28 - $\Delta D \times v_c$

Figura 5.9 - Influência de γ_0 sobre a sobremedida dos furos

5.3.5. Influência da Forma de Alimentação do Fluido de Corte

A sobremedida dos furos não foi influenciada sensivelmente pela forma de alimentação do fluido de corte. Analisando-se a Figura 5.10 (gráficos 29 e 30) percebe-se uma tendência a valores constantes da sobremedida dos furos, tanto para a alimentação externa como para a alimentação interna do fluido de corte.

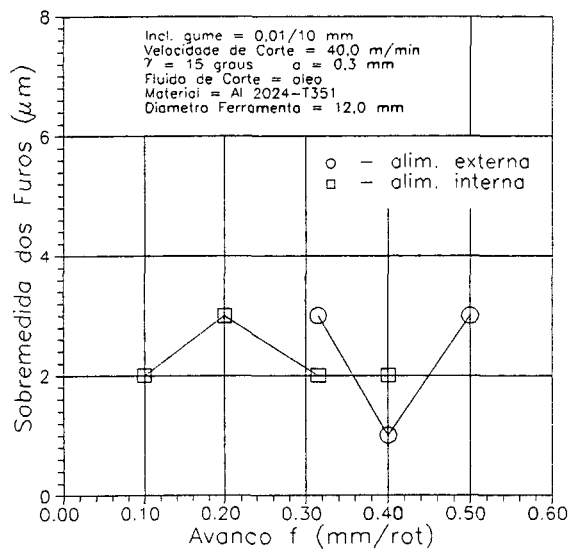


Gráfico 29 - $\Delta D \times f$

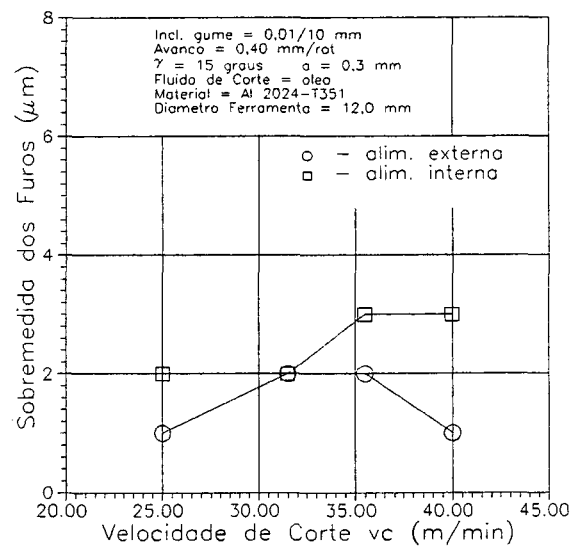


Gráfico 30 - $\Delta D \times v_c$

Figura 5.10 - Influência da forma de alimentação do fluido de corte sobre a sobremedida dos furos

5.4. Influência das Variáveis de Entrada sobre a Tolerância Dimensional

No alargamento de furos com alargadores de gume único, é comum a obtenção de furos com classe de tolerância IT6 [6,7,23], havendo também exemplos de furos com qualidade IT4 [27].

O gráfico 31 da Figura 5.11 mostra os resultados de sobremedida obtidos em 50 furos executados sob diversas condições de velocidade de corte, avanço, sobremedida de usinagem e alimentação do fluido de corte na liga de alumínio 2024-T351. O alargador de gume único com 12,0 mm de diâmetro foi regulado segundo o item 2.2.3, dentro da faixa de tolerância H7 (que para este diâmetro varia entre 12,000 mm e 12,018 mm). O ângulo de saída utilizado foi de 15°.

Analisando-se a dispersão dos valores dos diâmetros dos furos obtidos (5 μm) em relação ao diâmetro da ferramenta (12,007 mm), conclui-se que a ferramenta é adequada para o alargamento de furos com tolerância H6 (12,000 mm a 12,011 mm) e mais estreitas, pois, analisando-se a dispersão entre os valores dos menores diâmetros de furos em relação aos valores dos maiores diâmetros de furos ($\Delta\varnothing = 4\mu\text{m}$), obtém-se um intervalo de tolerância IT4. Isto pode ser obtido através de regulagens e controles dimensionais periódicos do diâmetro da ferramenta.

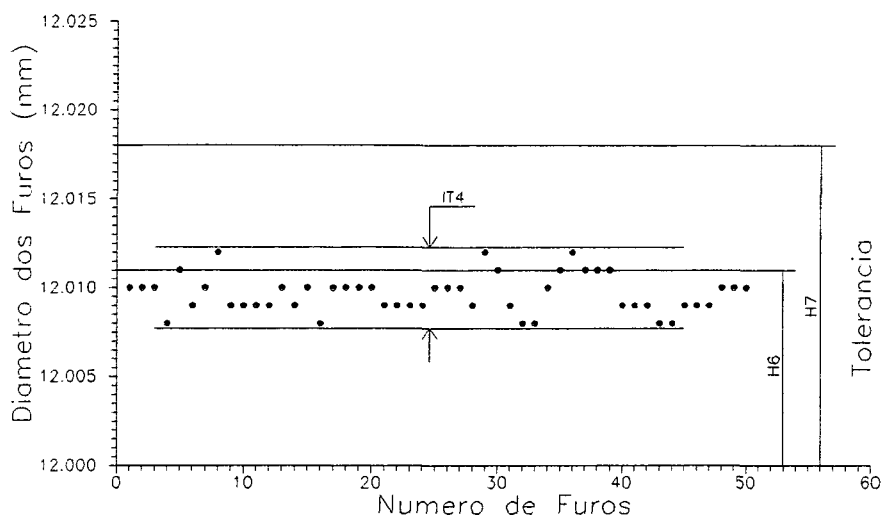


Gráfico 31 - D x Número de Furos

Figura 5.11 - Estudo da tolerância dimensional

5.5. Influência das Variáveis de Entrada sobre as Componentes da Força de Usinagem

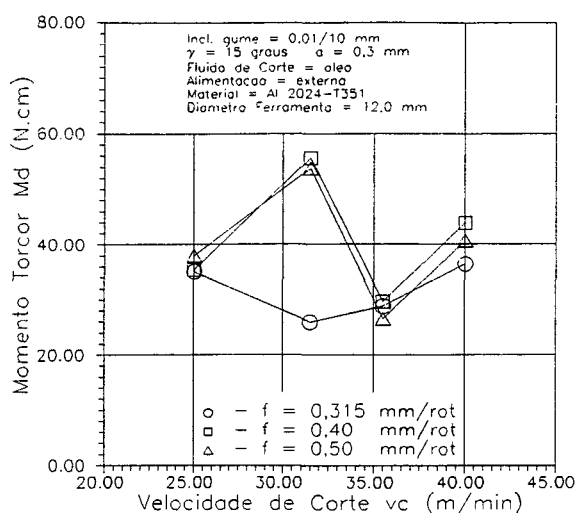
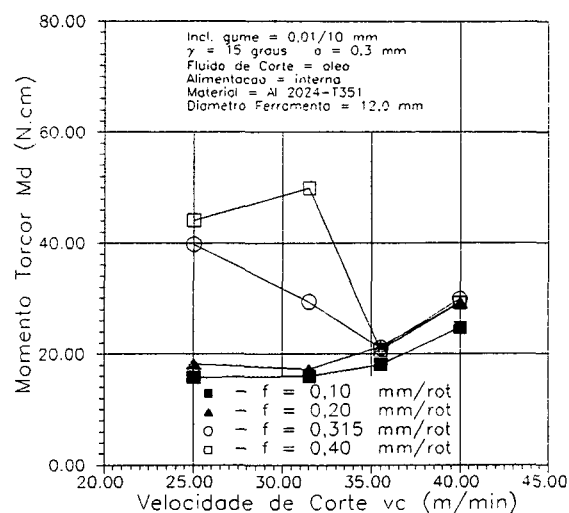
A análise dos resultados obtidos para as componentes da força de usinagem (momento torçor e força de avanço) leva em consideração as dispersões apresentadas pelos valores e analisa as tendências dos gráficos.

As tendências e os valores obtidos servem de orientação para comparações com resultados da literatura e para a retirada de conclusões sobre as possíveis causas dos mesmos.

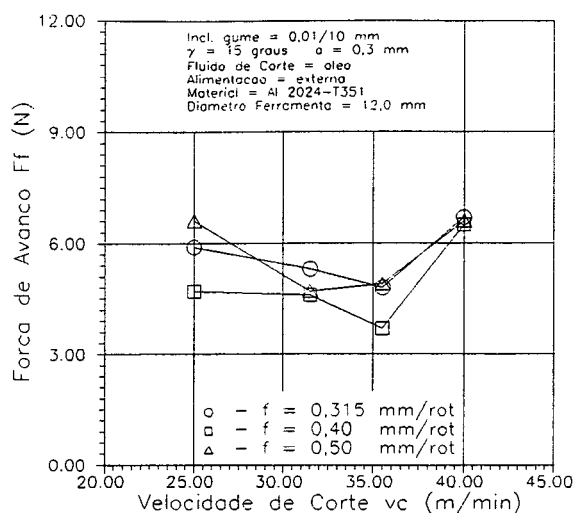
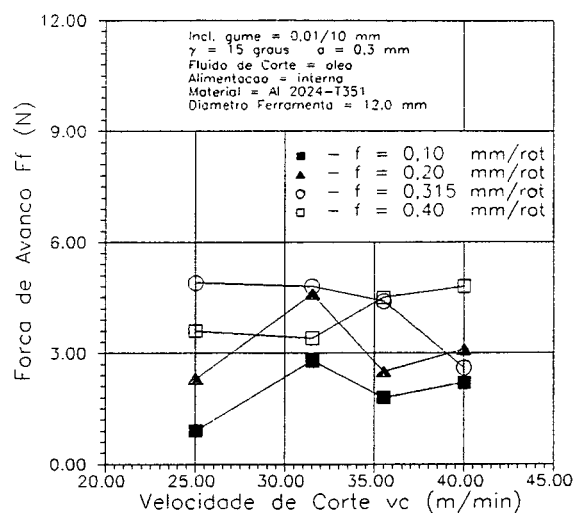
5.5.1. Influência da Velocidade de Corte

A análise dos resultados dos momentos obtidos dentro do intervalo de valores testados não permite conclusões claras decorrentes da variação da velocidade de corte. Os gráficos 32 e 33 da Figura 5.12 mostram que os valores variam dentro de uma certa faixa. Para alimentação externa de fluido de corte, esta faixa possui um valor máximo de 55 N.cm e um mínimo de 25 N.cm, para uma velocidade de corte de 31,5 m/min (gráfico 32); para alimentação interna, um valor máximo de 50 N.cm para uma velocidade de corte de 31,5 m/min e um mínimo de 15 N.cm para uma velocidade de corte 25 m/min (gráfico 33). Percebe-se também que os valores das curvas tendem a valores constantes com o aumento da velocidade de corte. Esta tendência também foi encontrada por Schroeter [7].

Em comparação com os valores encontrados por Schroeter [7], os valores aqui obtidos apresentam uma faixa de variação maior. Este aumento na faixa de variação se deve ao inserto intercambiável empregado possuir ângulo de direção χ_{r1} maior, ocorrendo, desta forma, uma penetração mais abrupta do gume no material, o que fornece valores de força de usinagem maiores do que as proporcionadas pela ferramenta empregada por Schroeter.

Gráfico 32 - $M_d \times v_c$ Gráfico 33 - $M_d \times v_c$ Figura 5.12 - Influência de v_c sobre M_d

Da mesma forma que o momento torçor, os valores obtidos para a força de avanço dentro do intervalo de velocidades de corte testado não possibilitam conclusões definitivas. Percebe-se, no entanto, que os valores da força de avanço variam dentro de uma faixa estreita (gráficos 34 e 35 da Figura 5.13), com uma tendência à queda nas forças para a alimentação interna do fluido de corte.

Gráfico 34 - $F_f \times v_c$ Gráfico 35 - $F_f \times v_c$ Figura 5.13 - Influência de v_c sobre F_f

5.5.2. Influência do Avanço

Os gráficos 36 e 37 da Figura 5.14 mostram o comportamento do momento torçor com a variação do avanço. Apesar da dispersão apresentada pelos resultados obtidos, percebe-se uma tendência de aumento do momento torçor com o aumento do avanço.

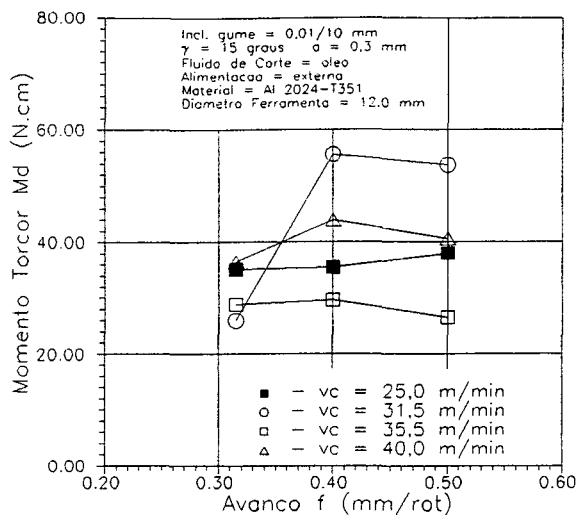


Gráfico 36 - Md x f

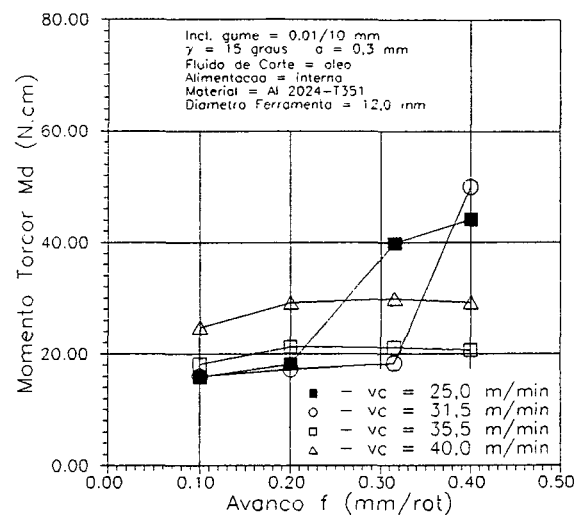
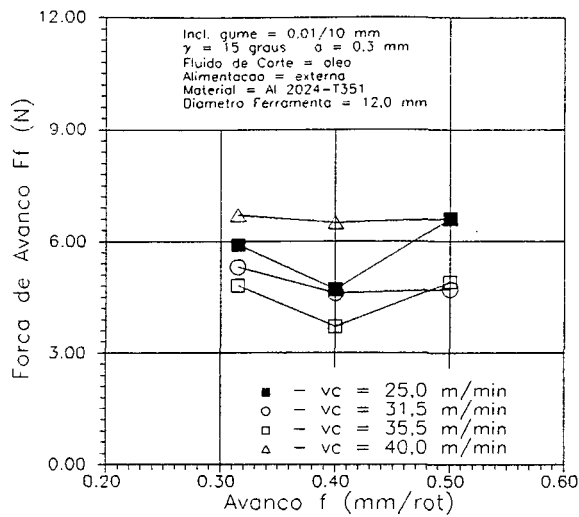
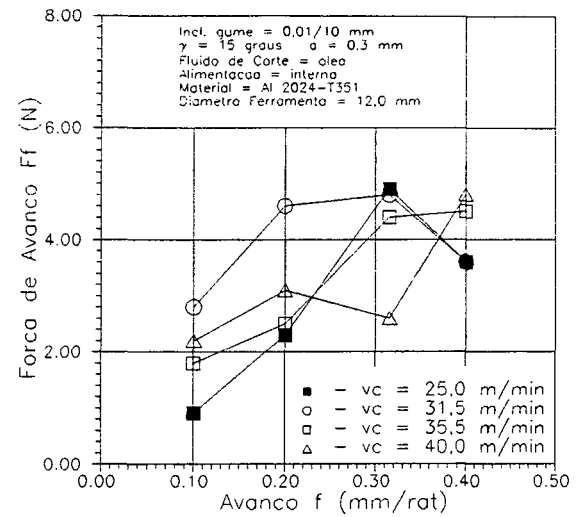


Gráfico 37 - Md x f

Figura 5.14 - Influência de f sobre Md

Assim como é verificado para o momento torçor, a força de avanço também apresenta uma variação irregular dos valores com o aumento do avanço. Percebe-se, porém, uma tendência de aumento da força de avanço com o aumento do avanço (Figura 5.15, gráficos 38 e 39).

Esta tendência de aumento das componentes da força de usinagem (momento torçor e força de avanço) já era esperada, pois, com o aumento do avanço há um aumento na seção de usinagem, exigindo deste modo, maiores forças de usinagem para realizar a retirada de material.

Gráfico 38 - $F_f \times f$ Gráfico 39 - $F_f \times f$ Figura 5.15 - Influência de f sobre F_f

5.5.3. Influência da Sobremedida de Usinagem

A influência do aumento da sobremedida de usinagem sobre os momentos e forças de avanço é apresentada nas curvas dos gráficos 40, 41, 42 e 43, Figura 5.16.

Verifica-se nos gráficos que, com o aumento da sobremedida de usinagem, temos um aumento das componentes da força de usinagem. Este aumento nos valores das componentes de usinagem ocorre devido a haver um aumento da seção de usinagem com o aumento da sobremedida de usinagem, sendo necessário, desta forma, um maior esforço da ferramenta para a retirada de material. Schroeter [7],

em seus ensaios, também observou este aumento das componentes de usinagem com o aumento da sobremedida.

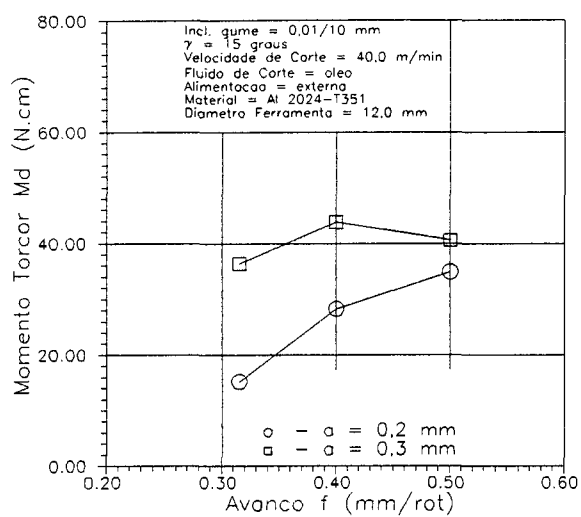


Gráfico 40 - Md x f

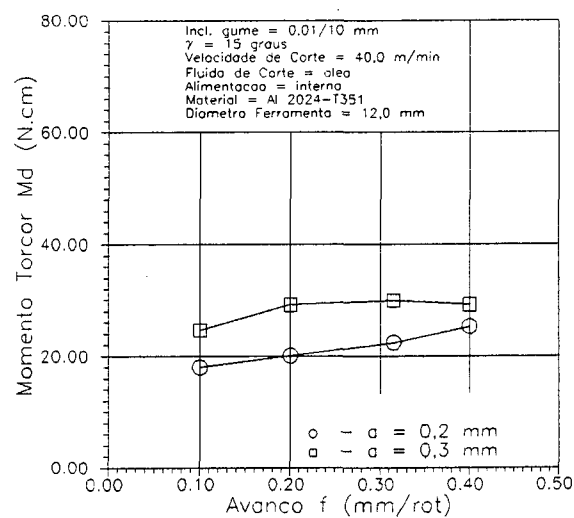
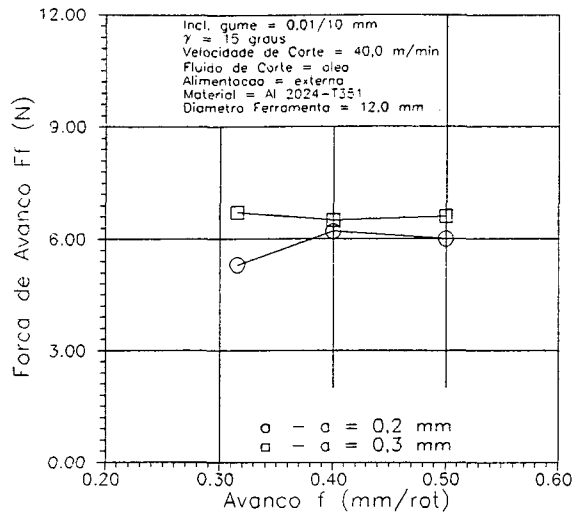
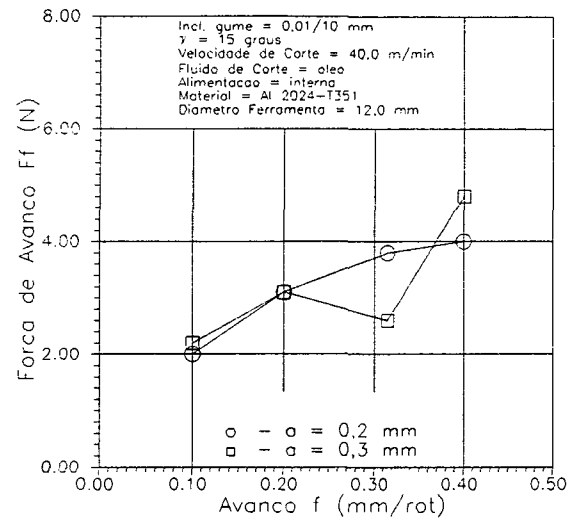


Gráfico 41 - Md x f

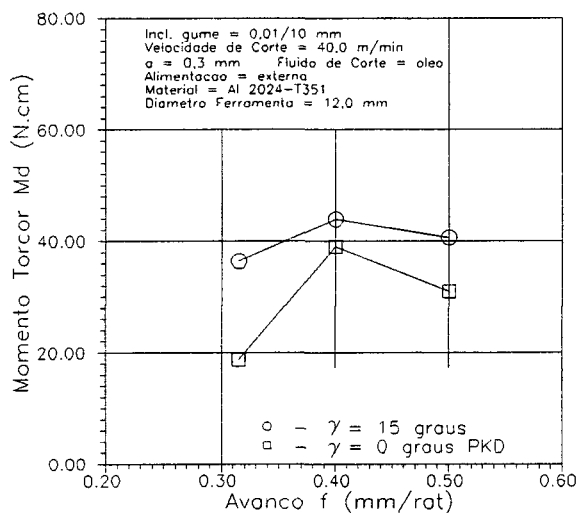
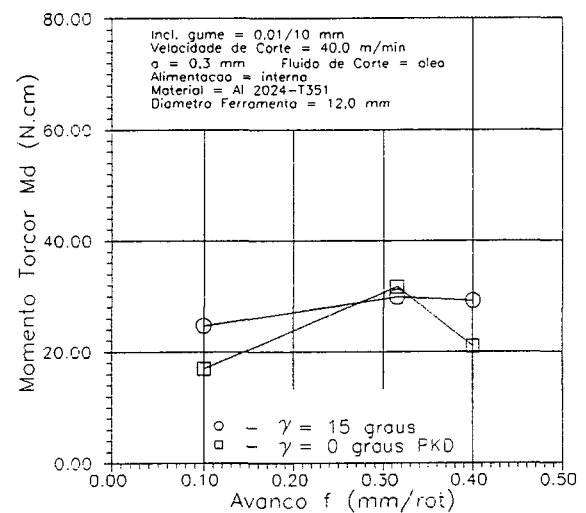
Figura 5.16 - Influência de "a" sobre Md e Ff (continua)

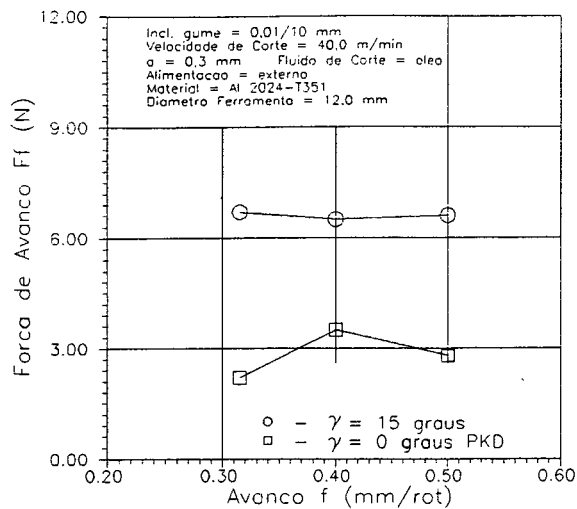
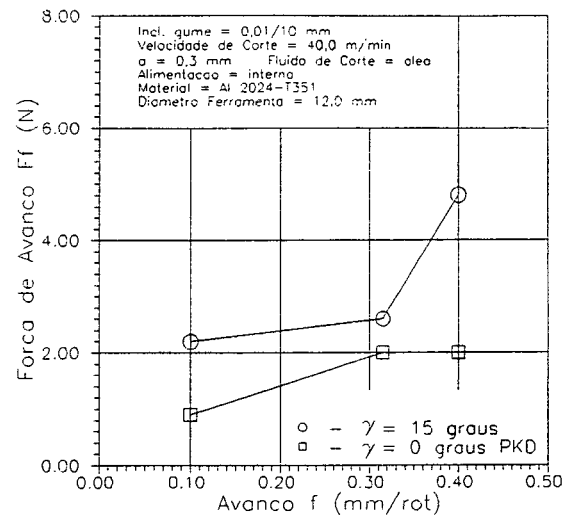
Gráfico 42 - $F_f \times f$ Gráfico 43 - $F_f \times f$ Figura 5.16 - Influência de "a" sobre M_d e F_f

5.5.4. Influência do Ângulo de Saída

Segundo Stemmer [10] e Koenig [24], as forças de usinagem tendem a diminuir com o aumento do ângulo de saída γ_o . Esta diminuição nas forças ocorre devido ao aumento do ângulo de saída propiciar uma melhor saída do cavaco e um melhor processo de corte. A Figura 5.17 (gráficos 44, 45, 46 e 47) mostra a influência da variação do ângulo de saída sobre as forças de usinagem. Através da análise dos resultados, verifica-se que, para $\gamma_o = 0^\circ$ (PKD - diamante policristalino), ocorrem os menores valores de momento torçor e força de avanço em comparação com os valores encontrados para $\gamma_o = 15^\circ$ (metal-duro), sendo este comportamento contrário ao

esperado. Schroeter [7] também constatou este comportamento para as forças de usinagem e explica que, com ferramentas de PKD é possível produzir gumes mais afiados do que com metal-duro e que o coeficiente de atrito do PKD com o cavaco é menor, o que leva a fatores de recalque menores de cavaco, diminuindo as componentes da força de usinagem.

Gráfico 44 - $M_d \times f$ Gráfico 45 - $M_d \times f$ Figura 5.17 - Influência de γ_0 sobre M_d e F_f (continua)

Gráfico 46 - F_f x f Gráfico 47 - F_f x f Figura 5.17 - Influência de γ_0 sobre M_d e F_f

5.5.5. Influência da Forma de Alimentação do Fluido de Corte

Os gráficos 48, 49, 50 e 51 da Figura 5.18 mostram a influência da forma de alimentação do fluido de corte sobre as componentes da força de usinagem. Analisando-se os resultados em relação aos furos executados com alimentação externa, para a alimentação interna é verificada uma diminuição dos valores das componentes da força de usinagem (momento torçor e força de avanço). Esta diminuição se deve a haver uma melhor lubrificação das réguas-guias (diminuição do atrito) e, também, a uma melhor.

retirada dos cavacos para fora dos furos com a alimentação interna em comparação com a alimentação externa do fluido de corte.

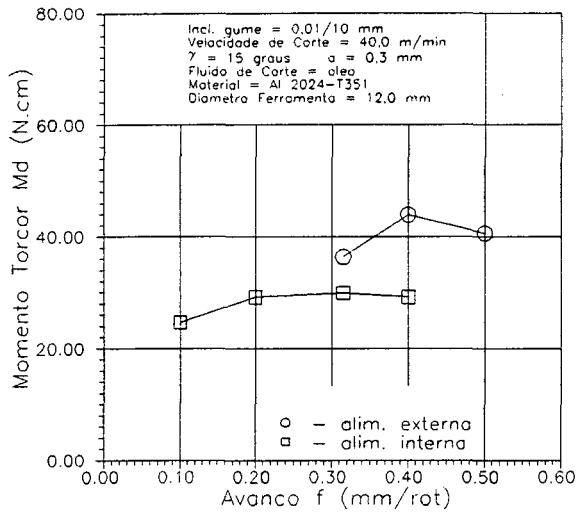


Gráfico 48 - Md x f

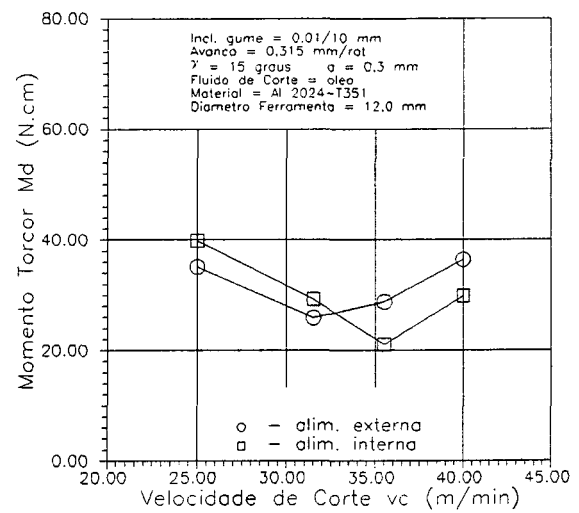
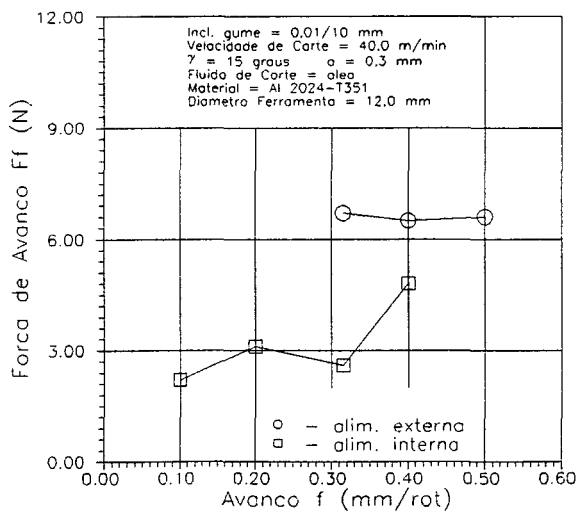
Gráfico 49 - Md x v_c 

Gráfico 50 - Ff x f

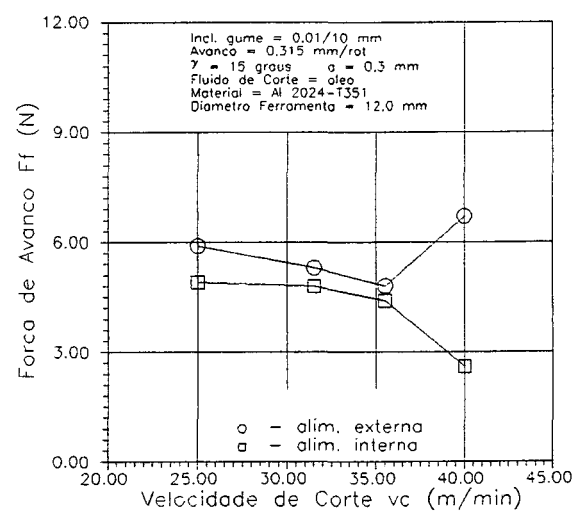
Gráfico 51 - Ff x v_c

Figura 5.18 - Influência da forma de alimentação do fluido de corte sobre Md e Ff

5.5.6. Influência do Diâmetro

A Figura 5.19 (gráficos 52, 53, 54 e 55) mostra a influência da variação do diâmetro da ferramenta sobre os momentos e as forças de avanço.

Percebe-se, através da análise dos valores encontrados para as forças na usinagem, que as mesmas se elevam com o aumento do diâmetro da ferramenta. Há um aumento dos momentos, pois os mesmos são dependentes do valor do diâmetro da ferramenta, isto é, quanto maior o diâmetro da ferramenta, maior será o valor do momento gerado. Já a força de avanço, que deveria ser constante para todos os diâmetros, aumenta devido ao inserto (gume) e as réguas-guias possuírem comprimentos diferentes para cada diâmetro de ferramenta. Então para diâmetros maiores, temos o inserto e as réguas guias mais longas, o que ocasiona um aumento de contato entre a ferramenta e a parede do furo e, conseqüentemente, um aumento do atrito.

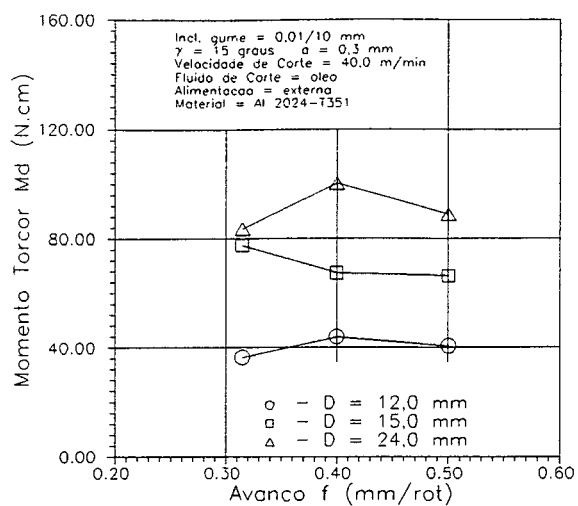


Gráfico 52 - Md x f

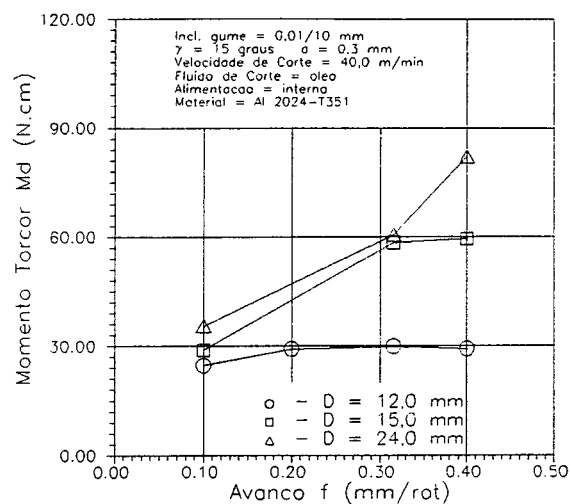


Gráfico 53 - Md x f

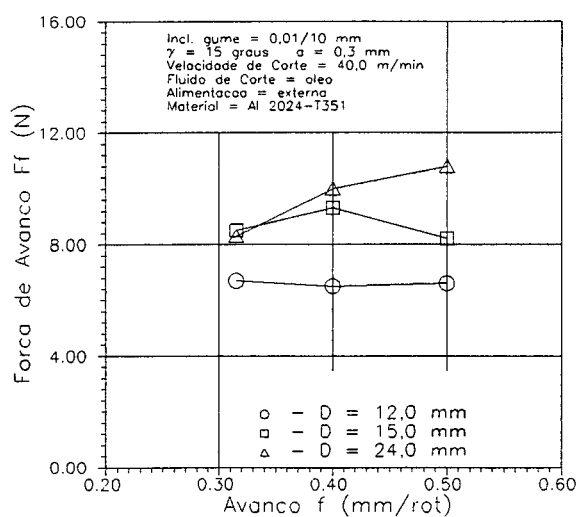


Gráfico 54 - Ff x f

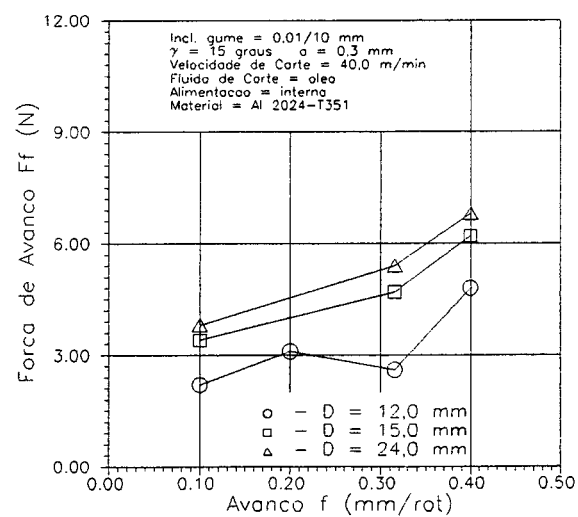


Gráfico 55 - Ff x f

Figura 5.19 - Influência do diâmetro sobre Md e Ff

5.5.7. Influência do Material da Peça

Os gráficos 56, 57, 58 e 59 da Figura 5.20 mostram o comportamento das forças de usinagem para as ligas de alumínio 2011-T3, 2024-T351, 6061-T6, 6262-T9 e 7075-T651 e para o bronze TM-23.

Pelos valores dos momentos encontrados, percebe-se que a liga de alumínio 6061-T6 apresenta os maiores momentos e a liga de alumínio 2011-T3, os menores. A liga 6061-T6 possui uma dureza igual e uma resistência mecânica menor que a liga 2011-T3. Este comportamento dos resultados dos momentos para estas ligas, se deve ao fato da liga 2011-T3 apresentar chumbo em sua composição química. O bronze TM-23 tem um comportamento semelhante à liga de alumínio 2011-T3.

As ligas de alumínio 2024-T351 e 7075-T651 apresentam os maiores valores de forças de avanço. Isto se deve às mesmas possuírem, em comparação com as outras ligas, maior dureza e resistência mecânica. Já as menores forças de avanço foram encontradas para a liga de alumínio 2011-T3 e para o bronze TM-23.

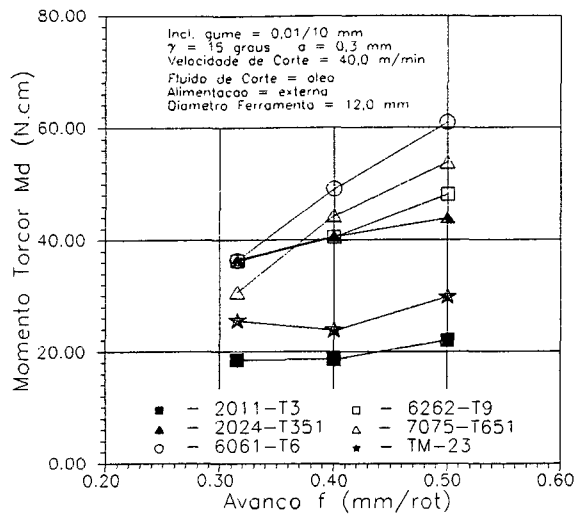


Gráfico 56 - Md x f

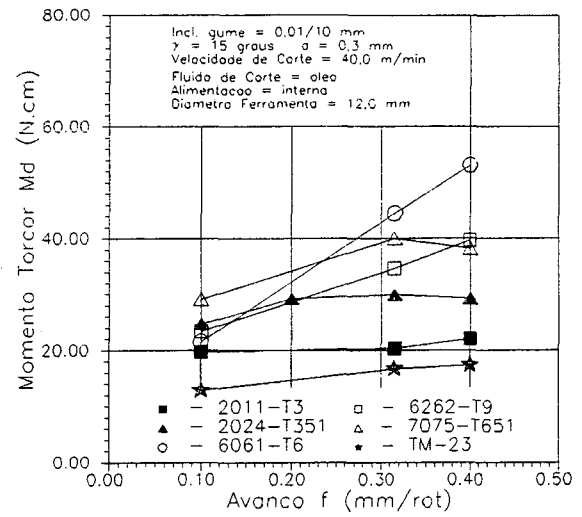


Gráfico 57 - Md x f

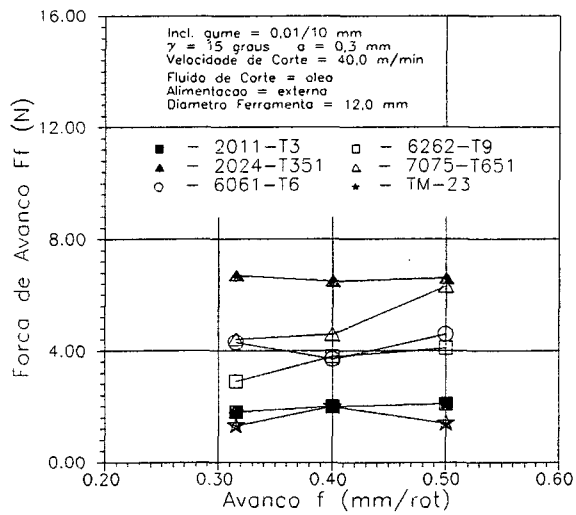


Gráfico 58 - Ff x f

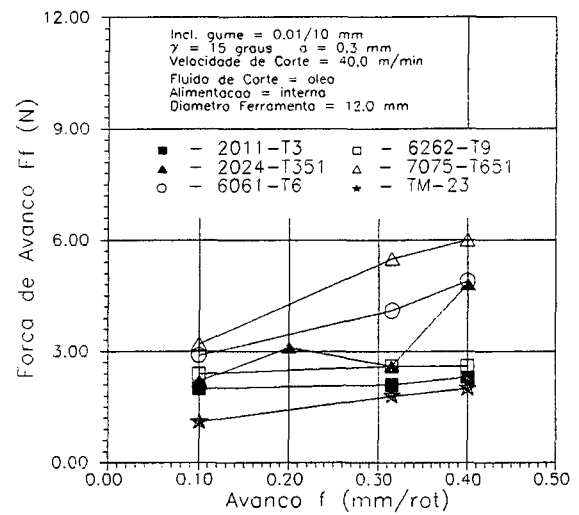


Gráfico 59 - Ff x f

Figura 5.20 - Influência do material sobre Md e Ff

C A P Í T U L O 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO

6.1. Conclusões

As exigências quanto à produção de furos com elevada qualidade superficial e tolerância dimensional estreita são satisfeitas com este tipo de ferramenta.

É possível a produção de furos com superfície "espelhada", isto é, com elevada qualidade superficial (obtem-se rugosidades R_a na ordem de $0,04 \mu\text{m}$).

A ferramenta permite a obtenção de furos com tolerâncias dimensionais da classe IT6 com facilidade e, através da possibilidade de regulagem da ferramenta, também são possíveis furos com classes de tolerância mais baixas (IT4).

Quanto à geometria dos furos, obtêm-se resultados expressivos de circularidade e cilindricidade. Estes valores ficaram na ordem de 1 a $4 \mu\text{m}$ para ambos.

Com o emprego da alimentação interna do fluido de corte, foram obtidos os melhores resultados quanto à rugosidade, comparando-se com os resultados obtidos para a alimentação externa.

Em comparação com os resultados da qualidade superficial encontrados por Schroeter [7] em seus ensaios, os valores obtidos para a rugosidade superficial foram, em geral, mais elevados. Isto se deve à geometria dos insertos utilizados por Schroeter proporcionarem uma entrada da ferramenta e um corte de material mais suaves

Os valores das forças de usinagem apresentaram uma elevada dispersão. Esta dispersão ocorre devido ao equipamento empregado para a medição da força de avanço F_f e do momento torçor M_d , não ser o mais adequado para a magnitude dos valores gerados no alargamento com este tipo de ferramenta.

Verificam-se valores menores para as forças de usinagem com o emprego da alimentação interna do fluido de corte. Em comparação com os resultados obtidos com a alimentação externa do fluido de corte, obtém-se, para algumas condições, redução de até 50 % nos momentos totais, e uma redução de mais de 100 % para as forças de avanço.

No alargamento das diversas ligas de alumínio e do bronze, verifica-se que as características mecânicas e a composição química dos materiais possuem uma grande influência sobre as forças de usinagem. Comparando-se os resultados obtidos para os momentos e forças de usinagem nos vários materiais, empregando-se condições

idênticas de corte, encontram-se variações de 5 % a mais de 100 % nos valores de força.

6.2. Sugestões para Continuidade do Trabalho

Nos ensaios com alimentação interna do fluido de corte, não foi possível a variação da vazão ou da pressão com que o fluido era lançado. Esse motivo limitou as velocidades de corte às empregadas para a alimentação externa. Espera-se que, com a possibilidade de controle da vazão e da pressão do fluido de corte, seja possível trabalhar com velocidades de corte maiores que 100 m/min. O aumento das velocidades de corte propiciariam uma elevação na produção com características de qualidade superficial, de forma e dimensional satisfatórias.

Nos ensaios empregaram-se insertos de metal-duro e de diamante policristalino (PKD). O Cermet se apresenta como uma nova alternativa de material empregado na fabricação de insertos intercambiáveis para os alargadores de gume único. Como objeto de estudos, podem ser feitas comparações de resultados obtidos com o emprego de vários materiais para insertos, verificando-se as qualidades obtidas, velocidades de corte e avanços-limites, e ensaios de longa duração para a obtenção das curvas de vida de cada material, obtendo-se deste modo subsídios para um cálculo de custo mais completo.

São sugeridos estudos e ensaios futuros para a determinação da parcela devida às réguas-guias dos alargadores na força de corte e da sua contribuição sobre a qualidade dos furos.

Sabe-se que as réguas-guias dos alargadores de gume único apresentam um chamado "efeito alisador" sobre as paredes dos furos, efeito pelo qual haveria um amassamento da superfície e, como consequência, uma melhora na qualidade superficial.

Propõem-se, também, ensaios de longa duração para a verificação da influência do desgaste das réguas-guias sobre a qualidade superficial, dimensional e forças de usinagem.

Em estudos futuros, deveriam ser realizados ensaios complementares quanto ao acabamento superficial e dimensional para as diversas ligas de alumínio e para o bronze empregados neste trabalho. Além disso, os alargadores de gume único cônicos e o alargamento de materiais ferrosos também devem ser objeto de estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ KRESS, D. Herstellung von Praezisionsbohrungen in der flexiblen Fertigung. **Werkstatt und Betrieb**, v. 119, n. 7 p. 589-592, 1986.
- /2/ KRESS, D. Reiben oder Feinbohren. **TZ fuer Metallbearbeitung**, v. 76, n. 2, p. 19-24, 1982.
- /3/ GEHRING, R. Schnittkraefte beim Reiben. **TZ fuer Metallbearbeitung**, v. 74, n. 7, p. 37-40, 1980.
- /4/ STEMMER, C. E. Ferramentas de furar, Florianópolis, UFSC, 1980, 29 p. (Apostila).
- /5/ SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS. **Tool and Manufacturing Engineers Handbook - Machinig**. 4. ed. Dearborn: One S.M.E. Drive, 1983, v. 1, cap. 9, p. 107-133: Reaming.
- /6/ KRESS, D. Feinbearbeitung Praeziser Bohrungen. **Werkstatt und Betrieb**, v. 114, n. 10, p. 741-743, 1981.
- /7/ SCHROETER, R. B. **Alargamento de Precisão em Alumínio Aeronáutico com Ferramentas de Gume Único Regulável**. Florianópolis, UFSC, 1989. 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, 1989.
- /8/ CHRISTOFFEL, K. Einstellbar - Einschneidenreibahle mit Wendeschneidplatte erzeugt hohe Oberflaechenguete. **Maschinenmarkt**, v.93, n. 44, p. 52-58, 1987.

- /9/ KRESS, D. Polykristalliner Diamant zum Feinbearbeiten von Bohrungen in Aluminium. **Werkstatt und Betrieb**, v. 118, n. 5, p. 253-256, 1985.
- /10/ STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte**: ferramentas simples de tornear. 2. ed. rev. e ampl. Florianópolis: Editora da U.F.S.C., 1989. 295 p. (Série Didática).
- /11/ MILLER, P. C. Better Tools Upgrade Boring and Reaming **Tooling & Production**, n. 10, p. 30-32, 1986.
- /12/ BECK GmbH. **Technologie des Reibens - Beschreibung und Einsatz des Ream-Beck-System RB01**. Winterlinger: Beck, 1988. (Catálogo do Fabricante).
- /13/ BECK GmbH. **Werkzeuge fuer hoechste Leistungen**. Winterlinger: Beck, 1988. (Catálogo do Fabricante).
- /14/ MAPAL - FABRIK FUER PRAEZISIONSWERKZEUGE DR. KRESS KG. **Short Blade Reamers for maximum output**. Aalen: mapal 1988 (Catálogo do Fabricante).
- /15/ STRIEGL, G. Maschinen-Reibahle mit Wendescheidplatte. **Werkstatt und Betrieb**, v. 119, n. 7, p. 600-602, 1986.
- /16/ SCHALLBROCH, H. **Das Waagerecht-Bohr-und Fraesewerk und seine Anwendung**. Berlin: Springer, 1959.
- /17/ BECK GmbH. **Einschneiden-Reibahle mit Wendeschneidplatte Ream-Beck RB01**. Winterlingen: Beck, 1989. 16 p. (Catálogo do Fabricante).
- /18/ CHRISTOFFEL, K. Cermets beim Reiben: Genauigkeit bei hohen Schnittgeschwindigkeiten. **Werkstatt und Betrieb**, v. 123, n. 5, p. 359-362, 1990.

- /19/ BECK GmbH. Single Blade Reamer, "Ream-Beck RB01".
Winterlinger: Beck, 1985. (Catálogo do Fabricante).
- /20/ ATKEY, M. Reamer Cuts Down on Costs. **Machinery and Production Engineering**, n. 9, p. 59-61, 1979.
- /21/ MERETZ, H. Spanende Werkzeuge bleiben einer der wichtigsten Faktoren der Fertigung. **Werkstatt und Betrieb**, v. 122, n. 12, p. 1059-1067, 1989.
- /22/ GUENTER, K. G. et al. Advanced Coatings by Vapours Phase Processes. **Annals of the CIRP**, v. 38, n. 2, p. 645-655, sep. 1989.
- /23/ JOHANNSEN, P. Beschichtete HSS-Werkzeuge in einer Grossserienfertigung. **VDI - Z**, v. 127, n. 21, p. 837-844, 1985.
- /24/ KOENING, W. **Fertigungsverfahren: Drehen, Fraesen, Bohren**.
Duesseldorf: VDI, 1990. v. 1, 409 p.
- /25/ HARA, A., NOMURA, T. "Uebersicht ueber die Entwicklung und den Stand der technik der Cermets in Japan".
Schneidstoffe und Werkzeuge, VDI Berichte 762, p. 13-22, 1989.
- /26/ JOHANNSEN, P & ZIMMERMANN, R. Drehen mit Cermets-Erfahrungen aus dem PKW-Aggregatebau. **VDI - Z**, 1989.
- /27/ HARD and superhard tools are a cut above the rest.
Metalworking Production, p. 92-104, oct. 1986.
- /28/ PORAT, R., BER, A. New Approach of Cutting Tool Materials - CERMET (Titanium Carbonitride-Based Material) for Machining Steels. **Annals of the CIRP**, v. 39, n. 1, p. 71 - 75, jan. 1990.

- /29/ STEIDLE, H. Bearbeitung von Bohrungen in Aluminiumlegierungen mit PKD-Werkzeugen. **IDR**, v. 2, p. 87-90, 1987.
- /30/ HOBOHM, G. Polykristalliner Diamant zum Drehen, Fraesen, Bohren, Reiben, Senken und Sägen von NE - Metallen. **Werkstatt und Betrieb**, v. 119, n. 1, p. 57-61, 1986.
- /31/ FOSHAG, S. Neue Schneidstoffe und Beschichtungen. **Werkstatt und Betrieb**, v. 122, n. 12, p. 1085-1087, 1989.
- /32/ DIETRICH, R. Polykristalline Diamant und CBN-Werkzeuge. **Werkstatt und Betrieb**, v. 116, n. 5, p. 269-274, 1983.
- /33/ SKF FERRAMENTAS S.A. **Manual Técnico**, São Paulo: SKF, 1987.
- /34/ WEINGAERTNER, L. W., SCHROETER, R. B. **Tecnologia de Usinagem do Alumínio e suas ligas: tornear, fresar, furar, serrar**. 1. ed. São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil, 1990, 75 p.
- /35/ HATSCHEK, R. L., MAYFIELD, J. Machining Aluminium. **American Machinist**, paginação irregular, mar. 1978. Special Report 702.
- /36/ MICHELETTI, G. F. **Tecnologia mecânica: Mecanizado por Arranque de Viruta**. Barcelona: Blume, 1980. 425 p.
- /37/ GAUTSCHI, G. H. Piezoelectric multicomponent force transducers and measuring systems. In: **TRANSDUCER CONFERENCE**, 1978, Winterthur. Anais. Winterthur: Kistler Instrumente AG, p. 1-23.
- /38/ NISHIGUCHI, T. et al. Advanced Grinding Technology for Precision Diamand Cutting Tools - Improving Accuracy of Tool Geometry. p. 183-203.

- /39/ BOEHS, L. **Metodologia de Ensaio Sistemático de Usinagem para Operações de Furação**. Florianópolis: U.F.S.C., 1989. 54 p. (Apostila)
- /40/ HUELLER HILLE GmbH. **Compact Center nb-h 65**. Num. 650578. (Catálogo do fabricante)
- /41/ KISTLER INSTRUMENTE AG. **4 Komponenten Dynamometer**. Ostfildern. Num. 69273 (Catálogo do Fabricante).
- /42/ KISTLER INSTRUMENTE AG. **Ladungsverstaerker mit Galvo-Ausgang**. Ostfildern. Num. 5006 (Catálogo do Fabricante).
- /43/ HEWLETT-PACKARD COMPANY. **Data Aquisition/Control Unit, modelo 3497A**. Colorado: Hewlett-Packard, 1980. (Catálogo do Fabricante).
- /44/ HEWLETT-PACKARD COMPANY. **Manual do Proprietário e Guia de Programação HP-85**. Colorado: Hewlett - Packard, 1981. (Catálogo do Fabricante).
- /45/ ROCHA, A. S. da. **Determinação de um Modelo de Força de Usinagem para a Furação, a partir do Modelo de Força de Usinagem do Torneamento**. Florianópolis, UFSC, 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, 1985.
- /46/ MOREIRA, L. J. T. **Elaboração de Software para Medição Automática dos Componentes da Força de Usinagem**. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA, 3, 1984, São Carlos - Anais. São Carlos: Secretaria, 1984, p. 297.

- /47/ CARL ZEISS. **Horizontal Metroscopes - ULM 02- 600**. DDR: Carl Zeiss, 1982. (Catálogo do Fabricante).
- /48/ CARL ZEISS. **Grande Microscópio para Ferramentas**. DDR: Carl Zeiss. (Catálogo do Fabricante, Manual do Usuário).
- /49/ FEINPRUEF GmbH. **Rugosímetro Perthometer M3A**. Goettingen: Feinpruef GmbH. (Catálogo do Fabricante).
- /50/ FEINPRUEF GmbH. **Circularímetro Formmeter MMQ2/Makrograph F1A**. Goettingen: Feinpruef, 13 p. (Catálogo do Fabricante).
- /51/ CARL ZEISS. **CNC Coordinate Measuring Machines with Universal 3D Probe Head**. DDR: Carl Zeiss. (Catálogo do Fabricante).
- /52/ GODOY RAMSAY, J. M. **Furação Profunda no Alumínio de Aviação com Brocas Normais**. Florianópolis, U.F.S.C., 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, 1987.
- /53/ SCHNEIDER, C. A. **Apostila de Técnicas de Pesquisa Experimental**. Florianópolis: U.F.S.C., 1990.
- /54/ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR - 6403, **Números Normalizados**. Rio de Janeiro, 1980, 4 p.

BIBLIOGRAFIA AUXILIAR

- /55/ STRIEGL, G. Maschinenreibahlen mit Wendschneidplatten rasch Einstellen. **Werkstatt und Betrieb**, v. 122, n. 7, p. 530-532, 1989.
- /56/ ROCEK, V. Einfluss der Schneidenqualitaet von Reibahle auf die Oberflaechenrauheit der Bohrungen. **Werkstatt und Betrieb**, v. 115, n. 12, p. 785-786, 1982.
- /57/ KUEMMEL, D. Neue Bearbeitungsverfahren - eine Herausforderung an spanende Werkzeuge. **Werkstatt und Betrieb**, v. 120, n. 12, p. 1038-1040, 1987.
- /58/ STRIEGL, G. Zweischneidige Maschinen-Reibahle mit Wendschneidplatten. **Werkstatt und Betrieb**, v. 121, n. 1, p. 67-69, 1988.
- /59/ CHENGZHOU, C. The Effect of Cutting Conditions on Torque and Surface Roughness in Reaming. In: **PROCEEDINGS OF THE METAL CUTTING CONFERENCE**, 1, 14 a 17 de mar. 1983, Bajie. Anais. Bajie: Chine Academic Publisher, 1983. p. 75-83.
- /60/ BAKER, A. The Use and Care of Reamers. **American Machinist**, n. 3, p. 71-75, 1975.
- /61/ ROCEK, V. Naschtellbare Hartmetall - Reibahlen. **Werkstatt und Betrieb**, v. 114, n. 9, p. 667-670, 1981.

- /62/ STRETMATER, F. F. Machinability of Aluminum Alloys. **American Machinist**. n. 4, p. 65-66, 1971.
- /63/ HOBOHM, G. Drehen, Fraesen und Reiben mit Polykristallinen Diamantwerkzeugen. **Werkstatt und Betrieb**, v. 119, n. 2, p. 119-121, 1986.
- /64/ FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, 5 re-impressão. São Paulo: Edgar Bluecher, 1977, v. 1. 751 p.
- /65/ SAKUMA, K., KIYOTA, H. Hole Accuracy with Carbide-Tipped Reamers: Effect of Alignment Error of Pre-Bored Hole on Reaming Action. **Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.**, v. 20, n. 2, p. 103-108, june 1986.
- /66/ ZHELEZNOV, G. S., SINGEEV, S. A. How Setting Errors Affect Job Accuracy. **Soviet Engineering Research**, v. 2, n. 9, p. 90-92, 1982.
- /67/ FRAGIN, I. E. et al. Precision Bore Forming by Diamond Reaming. **Soviet Engineering Research**, v. 5, n. 8, p. 67-69, 1985.
- /68/ LOURENÇO FILHO, Ruy de C. B. **Controle Estatístico da Qualidade**. 5 reimpressão. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1964, 223 p.
- /69/ MILTON, V. **Metodologia da Pesquisa Tecnológica**. Rio de Janeiro: Globo, 1985, 243 p.
- /70/ ARAÚJO, E. F. **Alargamento com Alargadores Convencionais**. Florianópolis: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - U.F.S.C. (Relatório Interno).

ANEXO 1

Materiais Utilizados

a) Ligas de Alumínio [34]

LIGA ELEMENTO QUÍMICO %	2011- T3	2024- T351	6061- T6	6262- T9	7075- T651
Si	0,27	0,09	0,61	0,67	0,09
Cu	5,22	4,75	0,20	0,25	2,25
Zn	0,045	0,10	0,048	0,045	4,20
Mn	0,033	0,69	0,063	0,09	0,04
Mg	0,027	1,25	0,91	0,98	1,98
Fe	0,37	0,15	0,31	0,39	0,05
Ti	0,026	- - -	0.017	0,093	- - -

TABELA 1 - Composição Química das Ligas de Alumínio

LIGA PROPRIEDADES MECÂNICAS	2011- T3	2024- T351	6061- T6	6262- T9	7075- T651
Resistência Tração MPa	380	470	310	400	570
Tensão de Escoam. MPa	295	325	275	380	505
Alongamento em 50 mm %	15	20	12	10	11
Dureza Brinell HB	95	120	95	120	150
Resistência Cisalh. MPa	220	285	205	240	330

TABELA 2 - Propriedades Mecânicas das Ligas de Alumínio

As ligas anteriormente descritas (Tabelas 1 e 2) são tratadas termicamente, onde as especificações T3, T351, T6, T651 e T9 significam:

T3 - solubilizado, encruado e envelhecido naturalmente a uma condição estável;

T6 - solubilizado e envelhecido artificialmente;

T9 - solubilizado, envelhecido artificialmente e encruado;

T_51 - alívio de tensões por estiramento.

b) Bronze TM-23

Elemento Químico	Cu	Sn	Pb	Zn
%	72	5	15	8

TABELA 3 - Composição Química (segundo SAE)

Propriedades Mecânicas (segundo SAE):

Resistência à Tração: 274 MPa

Tensão de Escoamento: 157 MPa

Alongamento: 23 %

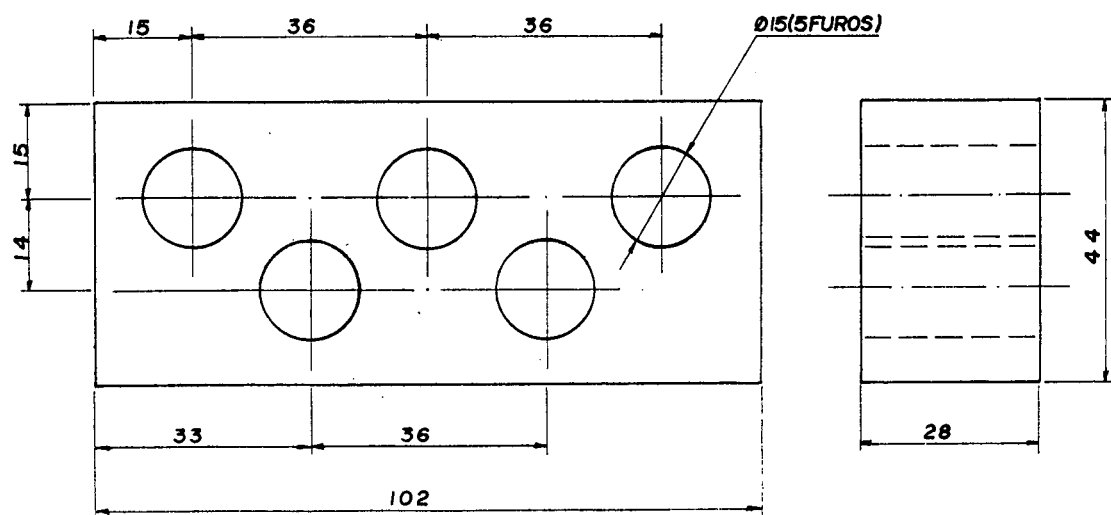
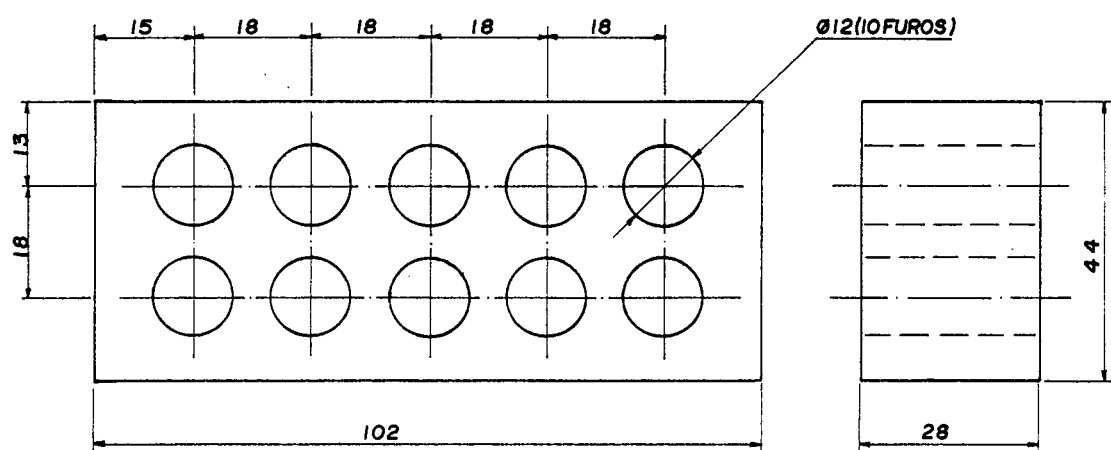
Dureza Brinell: 75 HB

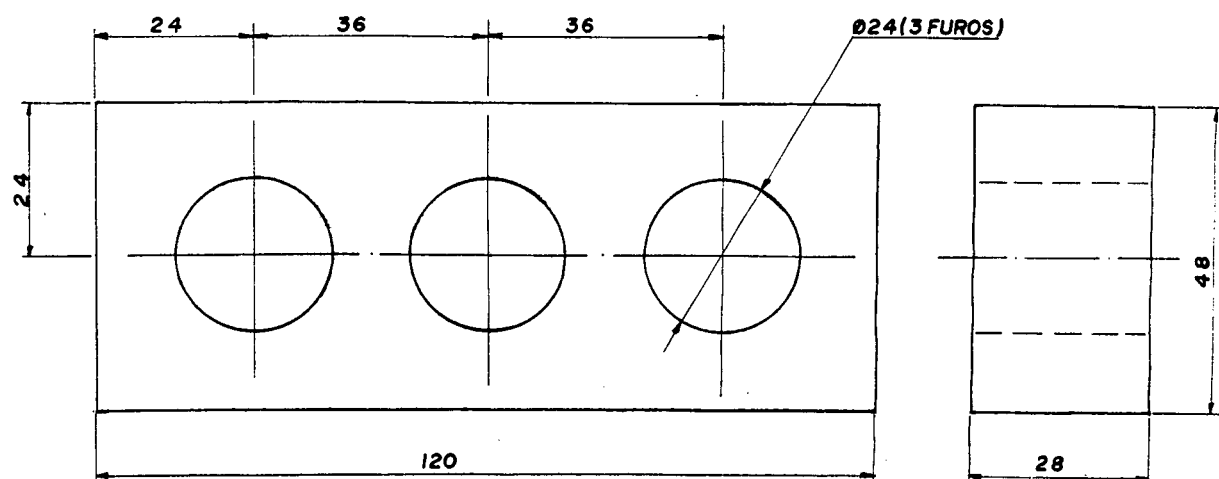
ANEXO 2

Corpos de Prova

a) Ligas de Alumínio 2024-T351 e 7075-T651

Os corpos de prova para estas ligas foram retirados de chapas.



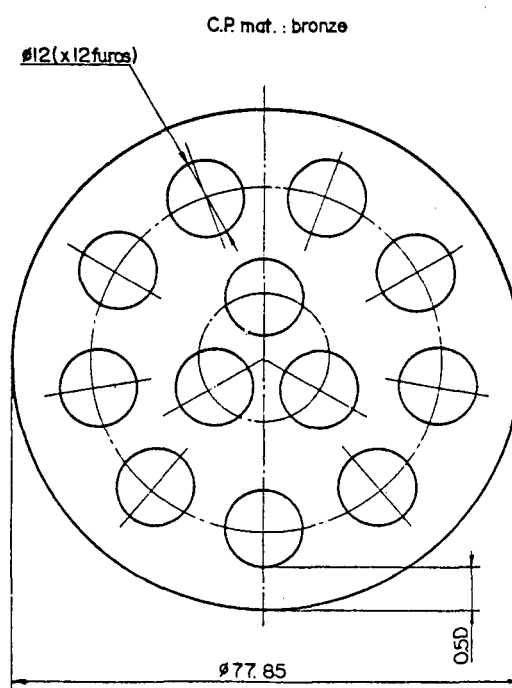
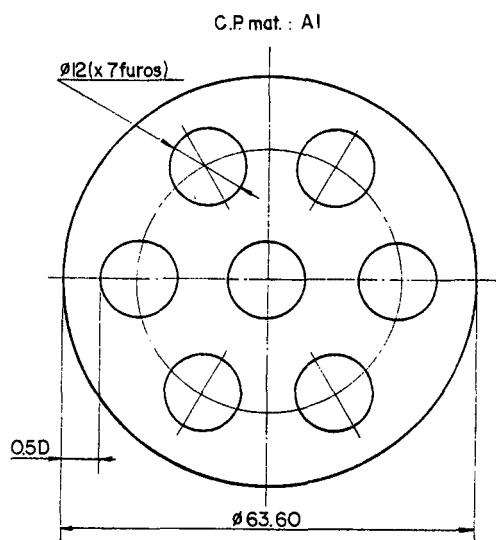


b) Ligas de Alumínio 2011-T3, 6061-T6, 6262-T9

Estes corpos de prova foram retirados de barras com 63,60 mm de diâmetro.

c) Bronze TM-23

Os corpos de prova de Bronze foram obtidos de barra com 77,85 mm de diâmetro.



ANEXO 3

Máquina-Ferramenta**a) Centro de Usinagem CNC**

Fabricante: Hueller Hille GmbH

Modelo: nb-h 65

Número: 8727-0109

Comando: Sinumerik 7M - Siemens

Capacidade de trabalho:

eixo X = 450 mm

eixo Y = 400 mm

eixo Z = 400 mm

Faixa de velocidades: 25...4000 rpm

variação contínua: 1 rpm

Faixa de avanços: 1...9999 mm/min

variação contínua: 0,001 mm/min

Máxima potência motora: 7,6 kW

Máximo torque: 160 N.m

Quantidade de ferramentas: 20

Erro de posicionamento: 10 μ m

Precisão de giro da mesa: $\pm 3^\circ$

Equipamento para Medir as Forças de Usinagem

a) Dinamômetro Piezelétrico

Fabricante: Kistler Instrumente A.G.

Modelo: 9273

Número de série: 142.405

	Ff	Md
Faixa de medição:	-5...20 kN	-100...100 N.m
Sinal mínimo de resposta:	0,02 N	0,02 N.cm
Sensibilidade:	-1,94 pC/N	1,65 pC/N.cm
Linearidade:	<±1 %FSO	<±1 %FSO
Histerese:	< 1 %FSO	< 1 %FSO
Diafonia:	Fz ⇒ Fx,y	<±1%
	Fx ⇔ Fy	≤±3%
	Fx,y ⇒ Fz	≤±3%
Frequência natural:	3,0 kHz	
Temperatura de utilização:	0...70° C	

b) Amplificador de Sinais

Fabricante: Kistler Instrumente A.G.

Modelo: 5006

Faixa de medição: -10...500.000 pC

Sensibilidade: -0,1...11.000 pC/unidade mecânica

Impedância de entrada: $-100\ \text{T}\Omega$

Faixa de frequência: 0...180 kHz

Precisão: $<\pm 1\%$

Linearidade: $<\pm 0,5\%$

Sinal parasita do cabo: $-3 \cdot 10^{-5}\ \text{pCrms/pF}$

Temperatura de utilização: 0...50° C

c) Unidade de Controle e Aquisição de Dados

Fabricante: Hewlett-Packard

Modelo: 3497 A

Impedância de entrada: $>10^{10}\ \Omega$ (escala de 1 a 10 V)

10 M.ohms $\pm 0,5\%$ (escala 100 V)

Resolução: 10 mV (para 3 dígitos, escala 10 V)

Número de aquisições/s: 12

d) Microcomputador

Fabricante: Hewlett-Packard

Modelo: HP-85

Memória RAM: 32 kBYTES

Interfaceado com um computador da IBM AT compatível

Equipamento para Regulagem e Verificação do Gume do Alargador**a) Metroscópio Horizontal**

Fabricante: Carl Zeiss

Modelo: ULM 02-600

Indicação do valor: digital

Resolução: 0,0001 mm

Força de medição: 1N

b) Microscópio de Ferramentaria

Fabricante: Nikon

Modelo: Measurescope

Aumento: 30 X

c) Grande Microscópio de Ferramentaria

Fabricante: Carl Zeiss

Graduação no ocular goniométrico: 0...360°

Resolução: 1'

Aumento: 50 X

Equipamento para Verificação da Qualidade dos Furos

a) Micrômetro Interno

Fabricante: Tesa

Resolução: 0,001 mm

Faixa de medição: 10...12 mm

b) Rugosímetro

Fabricante: Feinpruef GmbH

Modelo: Perthometer M3A

Número: 24 01 02

Tipo de rugosidade: Rt e Ra

Indicação do valor: analógica

Comprimento de medição: 1,5 - 4,8 - 15 mm

Comprimento de "cut-off": 0,25 - 0,8 - 2,5 mm

Faixas de medição: 0..0,25 - 0..2,5 - 0..25 μm (Ra)

0..1 - 0..10 - 0..100 μm (Rt)

c) Circularímetro

Fabricante: Feinpruef GmbH

Modelo: Formmeter MM02/Makrograph F1A

Número: 68 0029 2

Faixas de medição: ± 3 - ± 10 - ± 30 - ± 300 - ± 1000 μm

(com braço de 40 mm)

$\pm 6 - \pm 20 - \pm 60 - \pm 200 - \pm 600 -$

$\pm 1200 \mu\text{m}$ (com braço de 80 mm)

Filtros (4): 0...50, 0...150, 0...500, 15...500 ondas
por circunferência

Faixa de centragem eletrônica: 3...1000 μm

Tempo de centragem: 12 s

Indicação: analógica

d) Máquina de Medir por Coordenadas

Fabricante: Carl Zeiss - Alemanha

Modelo: ZMC 550

Número: 12098

Faixas de Operação: X = 550 mm

Y = 500 mm

Z = 450 mm

Incerteza de Medição: 1D = $\pm (1,0 + L/400) \mu\text{m}$

3D = $\pm (1,5 + L/250) \mu\text{m}$

Temperatura de Utilização: $20 \pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$

Resolução: 0,2 μm

ANEXO 4

ANEXO 5

Dados Técnicos Cond. de Utilização		ALARGADORES DE GUME ÚNICO		PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS FURA2I												
Tipo de Alargador		Tipo de alarg./Qual. Superficial		Corpo de Prova Número												
D. Alarg.(mm)		ARB 15/Rt = 1 a 4 μ m		Inserto Número												
Tolerância,		ARB 30/Rt = 2 a 6 μ m		Experiência Número												
Dim. ZS D.mm		Material/Ângulo de saída γ		Número de Scans												
Comp.mm		Resist. > 900 N/mm		Escala do Amplific.												
da MK		Resist. = 700 a 900 N/mm		Gume de Corte Número												
Haste ISO-SK		Resist. < 700 N/mm		Regul. do Gume Número												
Horizontal		Sobremedida de Usinagem														
Vertical		a = 0,1 a 0,5 mm														
Rotativo		Dados do Ensaio														
Estático		Scan	vc	f	Dia Al.	Con	Dia Fur	Rt	Ra	SF	SM	Crc	Cil	Fa	Mt	Jul
Furo pass/cego		N. Fur	m/min	mm/r	mm	mm	mm	μ m	μ m	%	%	μ m	μ m	N	N.cm	
Prof. Alarg.mm																
Qualid. Ra μ m																
Superf. Rt μ m																
Refr. int/ext																
Fluido Refrig.																
Pressão bar																
Vazão l/min																
Cabec. Flut.																
Tipo																
Material																
Resist. N/mm																
HB																
Dureza HRC																
Máquina Tipo		Operações em uma fixação? Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>														
Num. Rot. rpm																
Avanço mm/rot																
OBSERVAÇÕES / CROQUIS		Correções Erro Sistem.		Cavacos												
		Fa														
		Mt		Vida da Ferramenta												
		Obs: Outras Ferramentas		Executor do Ensaio												
				Local do Ensaio												
				Cidade												
		FLORIANÓPOLIS														
		Data														
		Folha de														